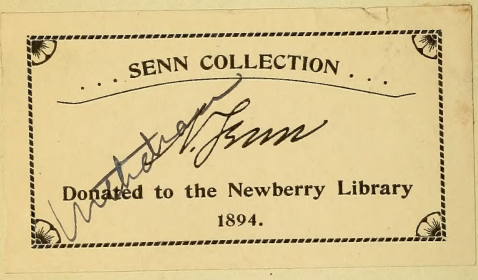
7. F. 50



Die

HÄMODYNAMIK

nach Versuchen

von

Dr. Alfred Wilhelm Volkmann,

Professor in Halle.

Nebst X Tafeln Abbildungen.

Leipzig,

Druck und Verlag von Breitkopf und Härtel.

1850.

15280

BOSTON MEDICAL
DEC 3 - 1918
LIBRARY

Vorrede.

Dass die Lehre von der Blutbewegung eine physikalische Basis habe, ist unter den Physiologen wenig bezweifelt worden, nur hat man diese Basis mehr aus allgemeinen Gründen angenommen, als im speziellen Falle nachgewiesen. Auch war dies in der Mehrzahl der Fälle bisher kaum möglich. Die Hydrodynamik hat sich mit Verhältnissen beschäftigt, die denen des Organismus meist so fern lagen, dass eine Uebertragung ihrer Lehrsätze auf die Vorgänge im Blutkreislaufe ganz unangemessen scheinen musste.

Um eine Physik der Blutbewegung möglich zu machen, musste die Hydrodynamik sich weiter ausdehnen und ihre Untersuchungen über Verhältnisse erstrecken, welche den organischen näher lagen. Diese physikalischen Vorarbeiten sind von mir unternommen und in den vier ersten Abschnitten meiner Schrift entwickelt worden. Ich habe dabei das Prinzip befolgt, von den einfacheren Verhältnissen allmälig zu den zusammengesetzteren überzugehen und die Bedingungen, unter welchen ich die Bewegung des Wassers in Röhren beobachtete, nach und nach denen ähnlicher zu gestalten, unter welchen das Blut durch seine Gefässe strömt.

Natürlich blieb auch jetzt noch zwischen den Bedingungen beider Fälle eine weite Kluft, und es kann das Bedenken entstehen, ob die von mir beabsichtigte Approximation an die organischen Verhältnisse überhaupt als eine Annäherung gelten

3824

könne, und nicht vielmehr in Beziehung zur Grösse der übrig bleibenden Unterschiede jede Bedeutung verliere. Hoffentlich werden die nachstehenden Untersuchungen im Stande sein, diese Zweifel zu beseitigen und nachzuweisen, dass man auf dem Wege physikalischer Forschung Gesetze findet, deren Beziehung zu den organischen Vorgängen unverkennbar und wichtig ist.

Ueberall wo Flüssigkeiten durch Röhren strömen, sind es drei Kräfte, welche die Aufmerksamkeit des Physikers vorzugsweise in Anspruch nehmen, nämlich erstens die Strömung und deren Geschwindigkeit, zweitens die Widerstände, welche der Bewegung entgegentreten und durch Hemmung des Stromes Spannung und Druck veranlassen, drittens endlich die Kraft, welche diese Widerstände besiegt und die Bewegung des Fluidums mit einer bestimmten Geschwindigkeit zu Stande bringt. Die Hydrodynamik hat das gesetzliche Verhältniss, in welchem diese Kräfte zu einander stehen, für starre, gerade und gleichmässig weite Röhren nachgewiesen und hat eine Formel aufgestellt, welche verschiedene zur Sache gehörige Fragen auf dem Wege der Rechnung zu lösen gestattet. Meine Untersuchungen beweisen, dass das hydrodynamische Gesetz nicht blos für die Bewegung des Wassers durch starre, gerade und gleichmässig weite Röhren gelte, sondern unter allen Umständen, wo Flüssigkeiten durch Röhren fliessen, in Betracht komme. Ich habe Versuche angestellt, in welchen ich mich bald winkelförmiger, bald ungleich weiter, bald in verschiedene Seitenarme sich spaltender Röhren bediente, ich habe starre und elastische Röhren benutzt, habe das Wasser bald durch einen gleichmässigen Druck, bald durch rhythmische Stösse in Bewegung gesetzt, und unter allen diesen so höchst verschiedenen Bedingungen gelang es, die Gültigkeit des einmal gefundenen Gesetzes nachzuweisen. In der That lassen sich mit Hülfe mathematischer Formeln die scheinbar regellosesten Verhältnisse entwirren, sobald man die Punkte gefunden hat, wo das hydrodynamische Gesetz in den Gang der Begebenheiten eingreift. Der Druck z. B., welcher in

einem System verzweigter Röhren sich an jedem Punkte anders ausweist, und welcher namentlich bei ungleichmässiger Weite der Röhren jeder wissenschaftlichen Erörterung Trotz zu bieten scheint, er ist berechenbar, indem er eine Function der Geschwindigkeit ist. Auch die Höhe und Tiefe der Wellen, die in elastischen Röhren entstehen, wenn Fluida unter dem Einflusse von Stössen durchströmen, sind Functionen der Geschwindigkeit und können, wenn letztere gegeben ist, mit ziemlicher Genauigkeit berechnet werden.

Unter solchen Umständen ist von vorn herein wahrscheinlich, dass man es mit Kräften zu thun habe, denen an der Grenze der organischen Welt kein Schlagbaum den Zutritt wehrt. Wie viel Spezifisches in den Verhältnissen der Blutbewegung auch vorkommen mag, immerhin ist das Blut eine Flüssigkeit, die Adern sind elastische Röhren und die Contractionen des Herzens wirken als Stösse; es ist also in den Bedingungen der mechanischen und organischen Vorgänge ein Gemeinschaftliches da, was eine Uebereinstimmung in den resultirenden Folgen vorauszusetzen berechtigt.

Um indess die Anwendbarkeit der physikalischen Lehrsätze auf den Kreislauf vollständig nachzuweisen, waren empirische Belege nöthig. Hierzu bedurfte es nun Untersuchungen über die zusammenfallenden Werthe des Blutdrucks und der Stromschnelle. Ich habe solche Untersuchungen in grosser Ausdehnung an den verschiedensten Thieren angestellt und zum Theil mit viel besseren Hülfsmitteln, als meinen Vorgängern zu Gebote standen, durchgeführt. Das reiche empirische Material, welches ich auf diese Weise gewonnen habe, wird muthmasslich selbst denen willkommen sein, welche den theoretischen Standpunkt, den ich einnehme, nicht billigen mögen.

Was mich betrifft, so kann ich nicht leugnen, dass ich zwischen den Vorgängen der Blutbewegung und den Erscheinungen, welche ich an todten Apparaten beobachtet hatte, die wesentlichste Uebereinstimmung finde. Das Wichtigste in dieser Be-

ziehung ist, dass auch im lebenden Thiere der Blutdruck sich als Function der Stromschnelle ergiebt und mit Hülfe der hydrodynamischen Formel aus dieser sich berechnen lässt. Freilich ist das Resultat der Rechnung immer nur ein annäherungsweise richtiges; aber wer da weiss, wie auch im Gebiete der Hydrodynamik mit allen mathematischen Formeln nur ungefähre Werthe zu erlangen sind, den wird der Mangel absoluter Uebereinstimmung zwischen den beobachteten und berechneten Grössen nicht irre machen. Ich erkläre diesen Mangel an Uebereinstimmung nicht daraus, dass das organische Geschehen von einem Prinzipe ausgehe, welches sich über den Zwang physikalischer Gesetze mit Freiheit erhöbe, sondern beziehe ihn auf die Mangelhaftigkeit der Beobachtungen einerseits und auf die Unzulänglichkeit der Formeln andererseits. Was nämlich die Beobachtungen betrifft, so ist die Ermittelung der physikalischen Bedingungen, deren Resultanten berechnet werden sollen, am lebenden Thiere meist zu schwierig, um grosse Genauigkeit zuzulassen, und was die hydrodynamischen Formeln anlangt, so sind sie so zu sagen erst aus dem Groben geschnitzt und erwarten noch von der Zukunft ihre feinere Ausbildung.

Derartige Bemerkungen könnten zu dem Einwurf Anlass geben, dass die Zeit für eine mathematische Behandlung der Blutbewegung überhaupt noch nicht gekommen sei. Und freilich, wenn die Mathematik nur da am Platze wäre, wo sie mit der Sicherheit auftreten kann, welche sie in verschiedenen Gebieten der Physik und namentlich in der Astronomie beurkundet, so würde der Morgen des Tages, wo auch die Physiologie einer mathematischen Behandlung würdig wäre, wohl noch lange auf sich warten lassen. Aber die Aufgabe der Mathematik als Gehülfin der Naturwissenschaft ist nicht blos die, schon erkannte Gesetze auszubeuten, sondern auch die, zur Gewinnung noch unerkannter beizutragen. Dies leistet sie unter Anderem dadurch, dass sie die vereinzelten Thatsachen unter allgemeine Gesichtspunkte von approximativer Geltung ordnet. So hat die Optik

die Vorgänge der Lichtbrechung im Auge wesentlich aufgeklärt, indem sie den brechenden Medien sphärische Flächen beilegte; eine Voraussetzung, welche gleichwohl nicht richtig ist und welche beim Rechnen zu Resultaten führt, die mit dem Thatbestande nie vollkommen übereinstimmen. Die Formeln, welche ich zur Berechnung hämodynamischer Verhältnisse anwende, beanspruchen mehr nicht, als angenäherte Werthe zu geben, und ich habe mir es angelegen sein lassen, die Fehlergrössen, über welche sie nicht hinauskommen, überall anzugeben. Wenn ich nun bei Berechnung der Geschwindigkeit, mit welcher das Blut durch eine Ader strömt, in den ungünstigsten Fällen mich um $\frac{1}{5}$ irre, so ist dieser Mangel an Genauigkeit an sich freilich beklagenswerth, aber in einer Wissenschaft, die sich zur Zeit noch genöthigt sieht, hypothetischen Zahlenwerthen eine Stellung zu gönnen, die um das Zehnfache von einander abweichen, ist eine Approximation bis auf $\frac{1}{5}$ vom wahren Werthe eine ganz leidliche Errungenschaft.

Indem ich die physikalische Tendenz meiner Arbeit überall fest zu halten suchte, musste ich es als meine Aufgabe betrachten, alle Vorgänge der Blutbewegung als nothwendige Folgen der ihr zu Grunde liegenden natürlichen Bedingungen aufzufassen. Unter diesen Bedingungen spielen Stoss und Druck, desgleichen Länge, Weite und Elasticität der Röhren, durch welche das Blut getrieben wird, die wichtigsten Rollen. Was mit solchen Kräften herstellbar und aus solchen Kräften begreiflich sei, habe ich vorzugsweise ermitteln wollen, unbekümmert darum, ob eine gewisse Schule der Physiologie dies als nutzlosen Ballast über Bord werfe. Von der Untersuchung dessen, was spezifisch vital heissen könnte, habe ich fast gänzlich abgesehen.

Bei dieser Richtung meiner Arbeit kann ich nur beklagen, dass mir nicht gründlichere mathematische Kenntnisse zu Gebote standen. Zögling einer altsächsischen Fürstenschule bin ich ausschliesslich im Studium der Alten gross gezogen worden und habe mich genöthigt gesehn, im zweiundvierzigsten Lebensjahre

mit den Anfangsgründen der Mathematik von vorn zu beginnen. Trotz vieler Mühe ist es mir nicht gelungen, mich über einen elementaren Standpunkt emporzuarbeiten, und ich ersuche die jüngere Generation, welche sich einer besseren Vorbildung zu erfreuen hatte, hierauf billige Rücksicht zu nehmen, wenn ihr nicht selten Spuren mathematischer Unbeholfenheit in meiner Arbeit entgegen treten werden. Dass prinzipielle Fehler in den mathematischen Betrachtungen vorkommen sollten, habe ich nicht zu fürchten, da ein Physiker vom Fache die Gefälligkeit gehabt hat, die Revision des Drucks zu besorgen.

Schliesslich muss ich allen denen meiner verehrten Collegen und lieben Schüler herzlichen Dank sagen, welche mich bei meinen Untersuchungen mit so grosser Bereitwilligkeit unterstützt haben. Ich unterlasse nur darum, sie namentlich anzuführen, weil in dem langen Zeitraum von zehn Jahren, welche über der Bearbeitung meiner Hämodynamik verflossen sind und in welchen mein Wohnsitz eine dreimalige Veränderung erfuhr, die Zahl derer, die mir hülfreich zur Seite standen, so gross geworden ist, dass ein Namensregister, welches Alle fassen sollte, den Leser ermüden müsste.

BOSTON MEDICAL
DEC 3 1918
LIBRARY

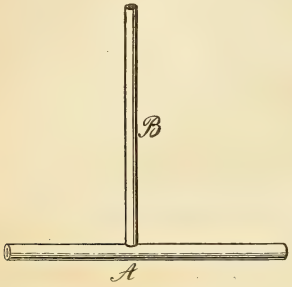
Cap. I.

Von der Bewegung einer Flüssigkeit durch starre, gerade und gleichmässig dicke Röhren.

§ 1. Jede Flüssigkeit, welche durch eine Röhre fliesst, übt eine doppelte Kraft aus, nämlich erstens eine Kraft in der Richtung der Längenaxe der Röhre, welche das Fliessen vermittelt und in der Geschwindigkeit der Strömung ihr Mass hat, und zweitens eine Kraft des Druckes, welche gegen die Röhrenwände wirkt und diese auszudehnen oder zu zersprengen strebt. Das häufige Springen der Röhren in weitgeführten Wasserleitungen beruht auf diesem Drucke, ebenso das Spritzen einer angebohrten Wasserleitung und einer geöffneten Blutader. Ich werde diese beiden Kräfte mit den Namen Stromkraft und Seitendruck bezeichnen.

§ 2. Da die Geschwindigkeit der Strömung das Mass der Stromkraft ist, so ist die Bestimmung derselben in der Hydrodynamik von Wichtigkeit. Man dividire das Volumen des Wassers, welches in t Zeittheilen aus der Röhre abgeflossen ist, mit der Durchschnittsfläche der Röhre, so erhält man die Länge eines Wassercylinders, welcher der Länge des Raumes gleichkommt, den das fliessende Wasser in t Zeittheilen zurücklegte. Die Physiker pflegen die Geschwindigkeit durch den Raum auszudrücken, welchen ein bewegter Körper in dem Zeitabschnitte einer Secunde zurücklegt, und bezeichnen im Allgemeinen diese Geschwindigkeit mit v. Ich werde diese Bezeichnung beibehalten.

§ 3. Noch leichter bestimmbar ist der Seitendruck. Man errichte auf der Röhre *A*, durch welche die Flüssigkeit strömt, die Röhre *B*, lothrecht und so, dass beide in Verbindung stehen.

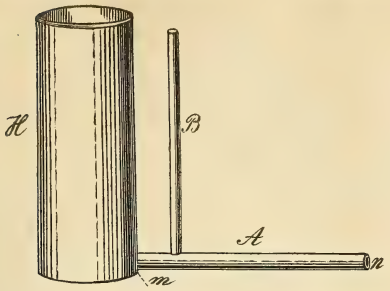


Uebt das Fluidum einen Seitendruck aus, d. h. drängt es gegen die Wandungen der Röhre *A*, so wird es auch in die offene Seitenröhre *B*, eindringen, und bis zu einer gewissen Höhe emporsteigen müssen. Das Ansteigen der Flüssigkeit in der Seitenröhre *B* wird so lange fortdauern, bis der Seitendruck, welcher das Fluidum hebt, und der Druck des Fluidums in *B*, als eines schweren, sich in's Gleichgewicht gesetzt haben.

Fliesst also durch *A* Wasser, so wird es in *B* bis zu einer gewissen Höhe emporsteigen, und die Höhe dieses Wasserstandes wird das directe Mass des Seitendruckes sein, welcher am Fusse der verticalen Röhre statt findet. Mit Bezug hierauf werde ich eine solche Verticalröhre Seitendruckmesser oder kurz Druckmesser nennen.

§ 4. Alle Erscheinungen vereinigen sich zu beweisen, dass der Seitendruck den Widerständen proportional sei, welche dem Strömen des Fluidums entgegentreten. Je länger die Röhre, durch welche die Flüssigkeit fliesst, je rauher ihre Wandungen, je enger die Ausflussöffnung und je klebriger die Flüssigkeit, um so grösser ist der Seitendruck.

Es ist nicht schwierig, den Zusammenhang zwischen den Widerständen und dem Seitendrucke verständlich zu machen. Gesetzt, wir hätten einen Wasserbehälter *H*, mit einer Oeffnung bei *m*, so würde sein Inhalt mit einer Schnelligkeit ausfliessen, welche dem Drucke der über *m* befindlichen Wassersäule entspräche.



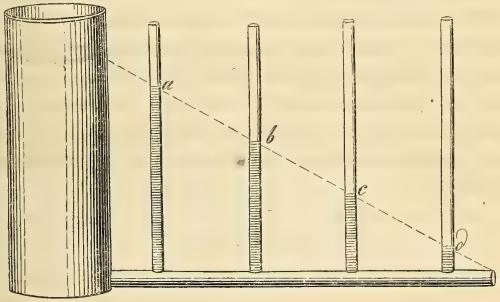
Würde dagegen vor der Ausflussöffnung m eine Röhre A angebracht, so würde das Wasser nun nicht mehr so schnell als vorher ausfliessen können, denn es würde auf dem Wege durch die Röhre, in Folge der Reibung, einen Theil seiner bewegenden Kraft verloren haben. Ist aber der Wasserbehälter in beiden Fällen gleichmässig gefüllt, wie hier vorausgesetzt wird, so ist die Druckkraft, welche das Wasser durch m drängt, in beiden Fällen ebenfalls dieselbe. Was also die Druckkraft nicht leisten kann in der Richtung der Röhrenaxe, als Stromkraft, das muss sie nun leisten in der Richtung gegen die Röhrenwandung als Seitendruck, denn diese ergänzt die Stromkraft bis zum Belange einer Wirkung, welche der des statischen Druckes, d. h. des Druckes, welcher durch die Höhe des Wasserstandes in H gesetzt ist, gleichkommt. Eine Bestätigung für die Richtigkeit dieser Auffassung liefert die Erfahrung, dass mit Verstopfung des Röhrenendes n das Wasser im Seitendruckmesser B bis zu derselben Höhe steigt, welche es im Wasserbehälter H hat. Indem die Stromkraft $= 0$ ist, wird die ganze statische Kraft auf Erzeugung von Seitendruck verwendet. Die Höhe des Wasserstandes im Seitendruckmesser ist eine Widerstandshöhe und stellt unmittelbar die Höhe einer Wassersäule dar, welche im Stande ist, der Druckkraft das Gleichgewicht zu halten, welche durch die Widerstände hervorgerufen und gegen die Basis des

Druckmessers gerichtet ist. Mit Beziehung auf die Abhängigkeit des Seitendruckes vom Widerstande wird ersterer auch Widerstandskraft genannt.

§ 5. Die eben angestellten Betrachtungen lehren auch, dass der Seitendruck von der Einflussmündung gegen die Ausflussmündung einer Röhre abnehmen müsse. Wir sahen, dass der Seitendruck um so grösser ist, jemehr sich die Widerstände häufen, welche die Bewegung der Flüssigkeit zu verhindern streben. Nun kann aber kein Zweifel sein, dass diese Widerstände von der Ausflussmündung der Röhre rückwärts gegen die Einflussmündung zunehmen. Das Fliessen des Wassers durch Röhren erfolgt nämlich durch ein Schieben von hinten *(vis a tergo)*, und wie jedes Molekül Wasser alle die Wassertheilchen, welche vor ihm, d. h. der Ausflussmündung näher, liegen, fortzuschieben hat, so sind auch alle diese vor ihm liegenden Theilchen Hemmungsmomente, welche seinen Bewegungen entgegentreten. Je näher also ein Molekül Wasser sich an der Einflussmündung befindet, um so mehr Hindernisse hat es vor sich, und um so mehr Druck muss es ausüben, um diese zu überwinden. Umgekehrt hat ein Wassertheilchen am Ende der Röhre gar keine Widerstände zu bekämpfen und wird dem entsprechend auch keinen Druck äussern. Die Erfahrung bestätigt alle diese Betrachtungen; denn wenn man auf einer horizontalen Röhre, durch welche Wasser fliesst, eine Anzahl gläserner Druckmesser errichtet, so sieht man, dass die Wasserstände in diesen von der Einflussöffnung abwärts stetig abnehmen, bis endlich, am Ende der Röhre, der Seitendruck gleich Null wird. Dieser letzte Umstand beweist nochmals, dass der Seitendruck lediglich als Wirkung der Widerstände auftritt. Aus diesem Grunde ist es möglich, die weniger zu Tage liegenden Verhältnisse des Widerstandes aus den leicht wahrnehmbaren Erscheinungen des Seitendruckes abzuleiten und die mit dem Druckmesser gewonnenen Resultate zur Begründung einer Theorie des Widerstandes der *Fluida* zu benutzen. Diese Bemerkung ist für das Verständ-

niss der nächsten Paragraphen von Wichtigkeit; denn wenn ich Widerstand und Seitendruck im Folgenden als gleiche Dinge behandle, so bezieht sich dies nicht auf die Gleichheit derselben als statische Kräfte, sondern auf deren Gleichartigkeit, in Ansehung der zu Grunde liegenden Gesetze.

§ 6. In einer Röhre von gleichmässigem Kaliber wird *caeteris paribus* jeder Abschnitt von gleicher Länge dasselbe Mass von Widerständen veranlassen, daher der Seitendruck, von der Einflussmündung aus gerechnet, nicht nur stetig, sondern gleichmässig abnehmen muss.



Die Wasserstände in den verschiedenen Druckmessern liegen in einer geraden Linie *a b c d*, und indem die Werthe der Seitendrucke sich wie die Entfernungen von der Ausflussöffnung, oder, was dasselbe ist, umgekehrt wie die Entfernungen von der Einflussöffnung verhalten, so braucht man in einer solchen Röhre nur den Seitendruck an zwei Punkten zu kennen, um ihn für jeden beliebigen berechnen zu können. Demgemäss läst sich auch der Seitendruck für den Anfangspunkt der Röhre berechnen. Ich will gleich hier bemerken, dass, wenn ich im Folgenden den Werth des Seitendruckes im Allgemeinen und ohne nähere Angabe des Ortes, wo er statt findet, anführe, immer der Seitendruck am Anfange des Rohres gemeint ist.

Wenn ferner der Seitendruck dem Widerstande proportional ist und sich wie die Entfernungen von der Ausflussmündung verhält, so kann kein Zweifel sein, dass sich der Widerstand, bei gleicher Stromschnelle, in verschiedenen Röhren wie deren Länge verhalten werde.

Verhielte sich bei unveränderter Stromschnelle $L : l = W : w$, wo L, l die verschiedenen Röhrenlängen und W, w die verschiedenen Widerstände bezeichnen, so wäre auch $L : W = l : w$, also $\frac{L}{W} = \frac{l}{w}$ und folglich das Verhältniss der Röhrenlänge zum Widerstande ein constantes.

Die Erfahrung bestätigt diese Voraussetzungen so weit, als bei der Schwierigkeit des Experimentirens über einen derartigen Gegenstand erwartet werden kann. Unter 6 Beobachtungen, welche ich an Zinnröhren von 7,03 Millimeter Durchmesser, bei gleicher Stromschnelle anstellte, ist das Verhältniss der Länge zum Seitendruck so ziemlich beständig, wie nachstehende Tabelle angiebt.

Versuche

über den Einfluss der Röhrenlänge auf den Widerstand, welchen das durch die Röhren fliessende Wasser findet.

Röhrenlänge L in Metern	Seitendruck S am Anfang der Röhre	Stromschnelle v in Metern	Verhältniss $\frac{L}{S}$
3,0	811 Mill.	1,010	3,70
2,5	666 »	1,016	3,75
2,0	513 »	1,008	3,81
1,5	373 »	1,011	4,02
1,0	252 »	1,010	3,97
0,5	129 »	1,012	3,88

§ 7. Mit Verminderung des Durchmessers der Röhren muss der Widerstand, welchen die strömende Flüssigkeit findet,

wachsen. Sowohl die Adhäsion zwischen der Flüssigkeit und der Röhrenwandung als auch die Reibung der erstern an vorspringenden Theilen der letztern, hat zur Folge, dass die äussere Schicht des durch die Röhre fliessenden Wassercylinders in ihrer Bewegung gehemmt wird. Abstrahiren wir davon, dass diese Schicht eine gewisse Dicke haben mag, so verhält sich der durch Reibung gehemmte Theil des Wassers zum nicht gehemmten, wie die Peripherie der Röhre zu ihrer Durchschnittsfläche. Da nun die Peripherie dem Durchmesser, dagegen die Durchschnittsfläche dem Quadrate des Durchmessers proportional ist, so wird bei Verengerung der Röhren die Masse des gehemmten Wassers in einfachen, dagegen die des nicht gehemmten in quadratischem Verhältnisse abnehmen, d. h. in engeren Röhren werden mehr Theilchen des durchströmenden Wassers gehemmt, als in weiten.

Mit Bezug auf diese Verhältnisse pflegt man anzunehmen, dass der Widerstand bei gleicher Stromschnelle sich umgekehrt wie die Durchmesser verhalte. Ist dies richtig, und berücksichtigen wir statt des Widerstandes den ihm proportionalen Seitendruck, S, so muss das Product des Durchmessers, D, in den Seitendruck constant sein.

$$S : S' = D' : D$$

also

$$SD = S'D'.$$

Um diese Annahme zu prüfen, liess ich Wasser in einer Stromschnelle von 1,487 Meter für die Secunde durch Röhren von verschiedenem Kaliber fliessen. Die nachstehende Tabelle gewährt eine Uebersicht über das Resultat der Untersuchung, und ich habe nur hinzuzufügen, dass jede in derselben eingetragene Zahl das Mittel aus mehreren ziemlich übereinstimmenden Beobachtungen ist.

Versuche

über den Einfluss der Röhrenweite auf den Seitendruck.

Substanz der Röhre	D = Durchmesser der Röhre in Mill.	S = Seitendruck am Anfang der Röhre	Product SD	S berechnet.*)
1. Zinn	12,876	128	1648,1	120,5
2. Zinn	9,78	176	1721,3	167,1
3. Zinn	7,03	244	1717,9	248,9
4. Messing	5,44	336	1827,9	340,6
5. Messing	4,588	415	1904,1	420,6
6. Messing	2,86	766	2190,8	762,1

Die vorletzte Columne zeigt, dass SD nicht constant ist, und obschon die dritte Beobachtung störend aus der Reihe fällt, so dürfte doch kaum zweifelhaft sein, dass das Product aus dem Durchmesser in den Seitendruck, und folglich auch in den Widerstand, mit allmäliger Verengung der Röhren, wachse. In diesem Falle würden die Beobachtungen beweisen, dass der Widerstand bei Verengung der Röhren in stärkerem Masse wüchse, als umgekehrt wie die Durchmesser, ein Resultat, welches auch Gerstner erhielt, und welches von vorn herein zu erwarten stand. Bei weiten Röhren ist die äussere gehemmte Schicht des durch die Röhre fliessenden Wassers, selbst wenn wir derselben eine gewisse Dicke einräumen, nur ein geringer Theil der bewegten Masse; bei äusserst engen Röhren dagegen kann man die ganze Wassermasse als gehemmt betrachten, indem die adhärirenden Schichten in der Achse des Wassercylinders aneinander stossen.

Hiernach sind in Haarröhrchen unverhältnissmässig grosse Widerstände zu erwarten, und die Beobachtungen *Poiseuilles* bestätigen diese Voraussetzung, wovon unten ausführlicher. (§ 22.)

*) Die Methode der Berechnung wird später erörtert. § 13.

§ 8. Die interessanteste Beziehung des Widerstandes ist die zur Stromschnelle. Wenn ein Fluidum fliesst, so müssen die Theilchen desselben, welche in den Röhrenwandungen haften, losgerissen werden. Ein solches Losreissen wird um so öfter erfolgen müssen, je rascher das Fliessen vor sich geht. Da nun die loszureissenden Theilchen einen Widerstand leisten, so verhält sich der Widerstand der Adhäsion wie die Geschwindigkeit.

Abgesehn von diesem Widerstande der Adhäsion, findet noch ein zweiter statt, indem die äusserste Schicht des Fluidums gegen die vorspringenden Theilchen der mehr oder weniger rauhen Röhrenwandung anstösst. Dieser Widerstand des Stosses ist ein Product aus der Zahl der Stösse in deren Kraft; und da jene wie diese der Geschwindigkeit proportional sind, so verhält sich der Widerstand des Stosses wie das Quadrat der Geschwindigkeit.

Der gesammte Widerstand würde demnach in einer Beziehung der Geschwindigkeit, v, in der anderen dem Geschwindigkeitsquadrate, v^2, proportional sein, und man braucht, um die Proportion in eine Gleichung zu verwandeln, nur jedem der beiden Glieder einen Coëfficienten beizugeben.

Für ein und dieselbe Röhre ist demnach die Gleichung für den Widerstand:

$$w = av^2 + bv$$

wo a und b die empirisch zu bestimmenden constanten Coëfficienten bezeichnen.

Es versteht sich von selbst, dass die Grösse dieser Coëfficienten von den Widerstandsursachen abhängen und mit der Mächtigkeit dieser steigen müsse, womit zusammenhängt, dass man die Widerstandsmomente verschiedener Röhren aus der relativen Grösse ihrer Coëfficienten beurtheilen kann.

§ 9. Die Erkenntniss der im vorigen § erwähnten Coëfficienten ist von der grössten praktischen Wichtigkeit. Ist man im Besitz derselben, so kann man für jede beliebige Stromschnelle, v, den zugehörigen Widerstand berechnen, wie die Formel direct

aussagt. Aber ebenso kann man aus dem bekannten Werthe von w die mit diesem zusammenhängende Stromschnelle berechnen.

Wenn nämlich:

$$a v^2 + b v = w$$

so ist $$v^2 + \frac{b v}{a} = \frac{w}{a}$$

und folglich $$v = -\frac{b}{2a} + \sqrt{\frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2}{4} + \frac{w}{a}}$$

Die letztere Formel dient also zur Berechnung der Stromschnelle, wenn der Widerstand gegeben und die Coëfficienten für eine bestimmte Röhre bekannt sind.

§ 10. Um die beiden Widerstandscoëfficienten bestimmen zu können, bedarf man mindestens zweier Beobachtungen, welche die zusammengehörigen Werthe des Widerstandes w, und der Stromschnelle v bestimmen. Aus der Theorie der Gleichungen ist bekannt, dass die gegebenen Werthe, aus denen die Unbekannten abgeleitet werden sollen, möglichst weit auseinander liegen müssen.*)

---

*) Die Berechnung der beiden Coëfficienten geschieht demnach in folgender Weise:

$$w = av^2 + bv \quad (Gl.\ I)$$
$$w' = av'^2 + bv' \quad (Gl.\ II)$$

$$\frac{w}{v} = av + b \quad (Gl.\ III)$$
$$\frac{w'}{v'} = av' + b$$

also $$\frac{w}{v} - \frac{w'}{v'} = av - av' = a(v - v')$$

daher $$\frac{\frac{w}{v} - \frac{w'}{v'}}{v - v'} = a.$$

Substituirt man den gefundenen Werth a in *Gl. III*, so erhält man b, wenn man das erste Glied der rechten Seite mit negativem Vorzeichen auf die linke bringt.

Hat man mehr als zwei Beobachtungen über das Verhältniss des Widerstandes zur Stromschnelle, so erlaubt die Methode der kleinsten Quadrate die Widerstandscoëfficienten mit grösserer Schärfe zu berechnen.

Zur Berechnung von a dient dann die Formel:

$$a = \frac{Sv^2 . Sv^2w - Sv^3 . Svw}{Sv^4 . Sv^2 - (Sv^3)^2}$$

wobei zu bemerken, dass S Summe bedeutet, also beispielsweise Sv^2 die Summe, welche man erhält, wenn man die Quadrate der beobachteten Werthe von v^2 zusammenrechnet.

Zur Berechnung von b dient dann die Formel:

$$b = \frac{Sv^4 . Svw - Sv^3 . Sv^2w}{Sv^4 . Sv^2 - (Sv^3)^2}$$

wo S, wie vorher, Summe bedeutet.

§ 11. Um die Anwendbarkeit der Formel $w = a\,v^2 + b\,v$ und die Möglichkeit, brauchbare Widerstandscoëfficienten nach der eben erörterten Methode zu finden, an einem Beispiele zu erweisen, theile ich nachstehende Beobachtungen mit, welche mit einer Messingröhre von 0,5 Meter Länge und 1,578 Millimeter Durchmesser angestellt wurden. Die beobachteten und die mit Hülfe der Coëfficienten $a = 0{,}0000911675$ und $b = 0{,}79921$, berechneten Werthe des Widerstandes stehen neben einander, auch ist in der letzten Columne die Differenz des beobachteten und berechneten Werthes angegeben. Zu bemerken ist noch, dass ich eigentlich nicht die Widerstände sondern die Seitendruck-Werthe beobachtet hatte, so dass für w in den Tabellen streng genommen S stehen sollte.*)

*) Aus frühern §§ muss klar sein, dass diese Substitution ganz unverfänglich ist, da Seitendruck und Widerstand denselben Gesetzen folgen. Hätten wir für w die wahren Werthe, statt der proportionalen Seitendrucke, so hätten wir zwar andre Coëfficienten, aber ebenfalls Constanten erhalten, was für die Formel gleichgültig ist.

Beobachtungen

über die zusammengehörigen Werthe von v und w in einer Röhre von 1,578 Mill. Durchmesser und 500 Millim. Länge.

	v beobachtet	w beobachtet	w' berechnet	Differenz zwischen w und w'
1)	1853 Millim.	1824 Mill.	1795 Mill.	$-\frac{1}{63}$
2)	1726 »	1648 »	1651,6 »	$+\frac{1}{457}$
3)	1676 »	1473 »	1486,4 »	$+\frac{1}{114}$
4)	1406 »	1299 »	1304,2 »	$+\frac{1}{249}$
5)	1236 »	1122 »	1127,9 »	$+\frac{1}{190}$
6)	1065 »	942 »	945,3 »	$+\frac{1}{314}$
7)	878 »	761 »	772,6 »	$+\frac{1}{66}$
8)	682 »	576 »	587,9 »	$+\frac{1}{48}$

Die Uebereinstimmung der gefundenen und berechneten Werthe ist so gross, dass die Brauchbarkeit der Rechnung in der Breite der vorliegenden Beobachtungen nicht in Frage gestellt werden kann. Im Gegentheil lässt sich die Vermuthung kaum abweisen, dass die Differenz zwischen den beobachteten und berechneten Werthen zum grösseren Theile auf Beobachtungsfehlern beruhe, in welchem Falle die theoretisch bestimmten Widerstände der Wahrheit näher kommen würden, als die beobachteten.

Versuche, wie die eben beschriebenen, habe ich in grosser Menge gemacht, und immer passte die Formel auf das Verhältniss zwischen Druck und Geschwindigkeit sehr gut, wenn die Röhren eine gewisse Weite hatten. Dagegen wird die Formel unbrauchbar, wenn die Röhren sehr eng werden, wie die unten stehende Tabelle nachweist. Ich bediente mich zu den Versuchen einer Glasröhre, welche eine Länge von 0,5 Meter und eine Durchschnittsfläche von 0,6581 □Millimeter hatte, und erhielt folgendes Resultat:

Beobachtungen

über die zusammengehörigen Werthe von w und v in einer Glasröhre von 0,5 Meter Länge und 0,9154 Mill. Durchmesser.

Beobachtet		berechnet	Rechnungsfehler
w	v	w'	
1022	430,3	1020,3	$-\frac{1}{601}$
1090	473,6	1118,2	$+\frac{1}{39}$
1349	555,7	1301	$-\frac{1}{28}$
1514	633,6	1470	$-\frac{1}{34}$
1768	807,9	1842,6	$+\frac{1}{24}$
1972	906,5	2046,1	$+\frac{1}{27}$
2314	1000,3	2235,5	$-\frac{1}{23}$

Hiernach wäre das Resultat der Rechnung nicht gerade sehr ungünstig, aber die aus den Beobachtungen abgeleiteten Coëfficienten waren:

$$a = -0{,}000239594$$
$$b = 2{,}4744.$$

Es war also der eine Coëfficient negativ, was theoretisch unmöglich ist und eben die Unzulässigkeit der Formel beweist. Ich werde erst weiter unten im Stande sein, hierüber Aufklärung zu geben.

§ 12. In der Formel $w = a\,v^2 + b\,v$ sind die Coëfficienten Factoren, welche von allen möglichen Widerstandsursachen, also auch von dem Durchmesser d und der Länge l der Röhren abhängen. Es wäre wünschenswerth eine Formel aufzustellen, in welcher die Factoren d und l als gesonderte Grössen vorkämen, da gerade der Einfluss der Weite und Länge der Röhren auf den Widerstand am häufigsten in Frage kommt. Gerstner hat versucht, eine derartige Formel aufzustellen, sie lautet:

$$w = \frac{4\,l}{d}\left(\alpha\,\frac{v^2}{4g} + \beta\,\frac{v}{\sqrt{d}}\right)$$

wo d den Durchmesser, g den Fallraum für eine Secunde, endlich α und β zwei empirisch zu bestimmende Coëfficienten bedeuten.*)

Versuchen wir zu zeigen, welcher Gedankengang dieser ziemlich complicirten Formel zu Grunde liege.

Man denke sich also, die Bewegung des Wassers in einer Röhre werde durch den Druck einer Wassersäule vermittelt, deren Höhe $= h$ und deren Querschnitt gleich dem Querschnitte der Röhre $= \frac{\pi d^2}{4}$ ist. Das Volumen dieser Wassersäule ist $\frac{\pi d^2}{4} . h$ und ihr Gewicht $= p . \frac{\pi d^2}{4} . h$, wenn p das Gewicht der Volumeneinheit bezeichnet. Die eben erörterte Kraft würde beschleunigend wirken, wenn nicht die Bewegung des Wassers auf Widerstände stiesse. Der Widerstand aber ist proportional der Röhrenwand $\pi d l$ und überdies eine Function der Geschwindigkeit, daher die verzögernde Kraft überhaupt $= \pi d l (a v^2 + b v)$.

Da nun das Ausfliessen des Wassers mit gleichförmiger Geschwindigkeit erfolgt, so findet offenbar Gleichheit zwischen der beschleunigenden und verzögernden Kraft statt. Unter diesen Umständen ergiebt sich also:

$$p \frac{\pi d^2}{4} h = \pi d l (a v^2 + b v)$$

$$\text{oder } p d^2 h = 4 d l (a v^2 + b v)$$

$$\text{also } h = \frac{4 l}{p d} (a v^2 + b v)$$

$$\text{und schliesslich } h = \frac{4 l}{d} \left(\frac{a}{p} v^2 + \frac{b}{p} v \right)$$

Nun kann man α für $\frac{a}{p}$ und β für $\frac{b}{p}$ substituiren.

*) F. J. Gerstner, Handbuch der Mechanik. Prag 1832. II. S. 176.

Daher $h = \frac{4l}{d}(\alpha v^2 + \beta v)$ oder, wie Gerstner schrieb, $h = \frac{4l}{d}\left(\alpha \frac{v^2}{4g} + \beta v\right)$, welche andere Schreibart nur dem empirisch zu bestimmenden Werthe von α influenzirt.

Jetzt ist h dieselbe Widerstandshöhe, welche in der früher benutzten Formel: $w = av^2 + bv$, für die dort vorausgesetzte constante Durchschnittsfläche der Röhre, mit w bezeichnet wurde.

Gerstner fand beim Aufsuchen der Coëfficienten, dass zwar α, nicht aber β constant ausfiel, indem nämlich β mit der Weite der Röhre stieg, und zwar annäherungsweise im Verhältnisse der Quadratwurzeln der Durchmesser.

Wäre nun wirklich $\sqrt{d}.\ \beta$ ein constanter Werth $= C$, wie wir ihn als Coëfficienten von v beanspruchen, so hätten wir

$$\sqrt{d}.\ \beta v = Cv$$
$$\beta v = \frac{Cv}{\sqrt{d}}$$

woraus sich ergiebt, dass das Glied, in welchem die einfache Geschwindigkeit vorkommt, mit $\sqrt{d}$ dividirt werden muss, wenn der Factor von v ein unveränderlicher Coëfficient sein soll. Mit Bezug hierauf schrieb Gerstner

$$w = \frac{4l}{d}\left(\alpha \frac{v^2}{4g} + \beta \frac{v}{\sqrt{d}}\right)$$

Ist diese Formel den Principien nach richtig, so muss sie die Veränderlichkeit des Productes Sd erklären, dessen Werth nach § 7. mit Abnehmen des Diameters zunimmt. Substituiren wir nämlich den Seitendruck S für den Widerstand w, so ist

$$S = \frac{4l}{d}\left(\alpha \frac{v^2}{4g} + \beta \frac{v}{\sqrt{d}}\right)$$
$$S = \frac{\alpha l v^2}{dg} + \frac{\beta 4 l v}{d\sqrt{d}}$$

Nun sind in den § 7 mitgetheilten Beobachtungen mit Ausnahme von d alle Werthe constant (vorausgesetzt natürlich, dass die Coëfficienten constant sind); man kann also setzen:

$$\frac{\alpha l v^2}{g} = m, \quad \beta 4 l v = n$$

Hiernach $$S = \frac{m}{d} + \frac{n}{d\sqrt{d}}$$

$$Sd = m + \frac{n}{\sqrt{d}}$$

Aus letzterer Formel ist leicht abzuleiten, dass mit Veränderung des Durchmessers auch das Product aus dem Durchmesser in den Seitendruck verändert werde.

Es sei $Sd = m + \frac{n}{\sqrt{d}}$ . . . . . *(I)*

und $S'd' = m + \frac{n}{\sqrt{d'}}$ . . . . *(II)*

dann ist $Sd - \frac{n}{\sqrt{d}} = m$ und $S'd' - \frac{n}{\sqrt{d'}} = m$

$$Sd - \frac{n}{\sqrt{d}} = S'd' - \frac{n}{\sqrt{d'}}$$

also $$Sd = S'd' + \left(\frac{n}{\sqrt{d}} - \frac{n}{\sqrt{d'}}\right) \ldots \textit{(III.)}$$

Darf nun nach Gerstner n als Constante betrachtet werden, so kann die Differenz $\frac{n}{\sqrt{d}} - \frac{n}{\sqrt{d'}}$ nie gleich Null sein. Setzen wir $d' < d$, so erhält die Differenz einen negativen Werth und muss in *(III)* von $S'd'$ abgezogen werden. Folglich ist $Sd < S'd'$, oder in Worten: das Product aus dem Diameter in den Seitendruck nimmt ab, wenn der Diameter zunimmt. Soweit wäre also die Formel mit den § 7 gegebenen Beobachtungen im Einklang. Um aber den Grad der Uebereinstimmung näher zu prüfen, berechnete ich aus der § 7 mitgetheilten Tabelle die Werthe für m und n. Es ergab sich:

$m = 992{,}73$; *log.* 2,99667.
$n = 2007{,}7$; *log.* 3,30269.

Mit Hülfe dieser Coëfficienten, habe ich den Werth Sd nach

Gleichung *(I)* berechnet und mit den beobachteten verglichen. Es ergiebt sich:

Beobachtung	Durchmesser	Seitendruck S	Product Sd. gefunden	Product Sd. berechnet	Differenz
1.	12,876	128	1648,1	1552,2	$-\frac{1}{17}$
2.	9,78	176	1721,3	1634,7	$-\frac{1}{20}$
3.	7,03	244	1717,9	1749,9	$+\frac{1}{54}$
4.	5,44	336	1827,9	1853,5	$+\frac{1}{71}$
5.	4,588	415	1904,1	1930	$+\frac{1}{73}$
6.	2,86	766	2190,8	2179,8	$-\frac{1}{199}$

Die berechneten Werthe nähern sich also den beobachteten so ziemlich.

§ 13. Demnach ist die Gerstnersche Formel unter Umständen werthvoll, und folglich das Aufsuchen der Factoren α und β nothwendig. Durch Transformation der Formel

$$w = \frac{4l}{d}\left(\alpha\,\frac{v^2}{4g} + \beta\,\frac{v}{\sqrt{d}}\right)$$

entsteht $w = \frac{l\alpha}{dg}\,v^2 + \frac{4l\beta}{d\sqrt{d}}\,v.$

Nun hatten wir nach § 9:

$$w = av^2 + bv.$$

Also ist $a = \frac{l\alpha}{dg}$ und $b = \frac{4l\beta}{d\sqrt{d}}$

Sind nun die Coëfficienten a und b nach der früher erklärten Methode (§ 10 und 11) aufgefunden und die Werthe für l, d und g durch Beobachtung ermittelt, so ergiebt sich, wenn

$$a = \frac{l\alpha}{dg}$$

$$\alpha = \frac{adg}{l}$$

desgleichen, da $b = \frac{4l\beta}{d\sqrt{d}}$

$$\beta = \frac{bd.\sqrt{d}}{4l}$$

Gerstner erhielt in Versuchen mit Röhren von 1 — 5″ Durchmesser sehr constante Coëfficienten, so dass er $\alpha = \frac{1}{180}$, $\beta = \frac{1}{18000}$ Wiener Zoll ansetzt. Diese Beständigkeit der Factoren kann freilich keine absolute sein. In den von mir angestellten Beobachtungen an dünnen Metallröhren schwankte α zwischen $\frac{1}{151}$ und $\frac{1}{228}$ Millimeter, β dagegen noch weit mehr, zwischen $\frac{1}{17000}$ und $\frac{1}{38229}$ Millimeter.*)

Es liegt am Tage, dass die Benutzung gleicher Coëfficienten für Röhren von verschiedener Länge und verschiedenem Durchmesser nur dann möglich sein wird, wenn in Folge günstiger Umstände alle Widerstandsursachen, welche, abstrahirt von der Länge und dem Durchmesser, sich geltend machen können, gleich wirksam sind.

§ 14. Sowohl der Seitendruck als die Stromkraft, welche die durch Röhren strömenden Flüssigkeiten äussern, sind abhängig von einer Kraft, welche das Fluidum in die Röhren hineintreibt. Mag diese Kraft herstammen, woher sie wolle, immer kann ihre mechanische Wirkung auf den Druck einer Wassersäule von bestimmter Höhe zurückgeführt werden. Halten wir diese Vorstellung fest und denken uns demnach, dass die Röhre, durch welche das Fluidum tritt, mit einem Wasserbehälter in Verbindung stehe und von diesem gespeist werde, so ist klar, dass die Höhe des Wasserstandes in letzterem den Druck hergebe, welcher einerseits die Widerstände gewältigt, andrerseits die Strömung zu Stande bringt. Es kann demnach kein Zweifel sein, dass die Höhe des Wasserstandes im Druckgefässe die Summe zweier Wasserhöhen sein müsse, von welchen die eine ausreichen soll, das Fliessen, abstrahirt vom Widerstande, hervor zu bringen, die zweite aber zur Aufgabe hat, die Widerstände

*) Zu bemerken ist, dass der Coëfficient β und folglich das zweite Glied der Gleichung sich nach demjenigen Masse richtet, dessen man sich bei Anstellung der Versuche bediente. Dagegen kann der Coëfficient α auf jedes beliebige Mass bezogen werden. In der § 9. mitgetheilten Tabelle passen die Coëfficienten $\log \alpha = 0{,}64236 - 3$, $\log \beta = 0{,}82935 - 4$ Millim.

zu besiegen, die dem Fliessen entgegenstehn. Man kann in diesem Sinne von einer Geschwindigkeitshöhe, f, und einer Widerstandshöhe, w, sprechen, und erhält demnach, wenn die Höhe des Wasserstandes im Druckgefässe mit H bezeichnet wird, die Gleichung

$$H = f + w.$$

§ 15. Es folgt aus der Natur der Gleichungen selbst, dass, wenn von den drei hier berücksichtigten Kräften auch nur zwei gegeben sind, die dritte sich berechnen lasse, womit für die Hydrodynamik bereits viel gewonnen ist. Indess kommen Fälle genug vor, wo nur eine dieser Kräfte direct gemessen werden kann, und der Physiker hat auf Mittel zu denken, wie sich dieser Uebelstand überwinden lasse. Wir werden zeigen, dass es genügt, die Geschwindigkeit der Strömung, welche leicht messbar ist, und eine der erwähnten Kräfte, jedoch mit Ausnahme von f, zu kennen, um die Werthe der noch übrigen beiden Grössen durch Rechnung zu finden.

Die Geschwindigkeit der Strömung steht in einem gewissen Verhältnisse zu f, oder zur Geschwindigkeitshöhe. Nach dem bekannten Torricellischen Gesetze strömen Flüssigkeiten aus der freien Oeffnung eines Behälters mit der Geschwindigkeit eines fallenden Körpers aus, welchem die Höhe des Wasserstandes über der Ausflussöffnung zur Fallhöhe gedient hat. Die Formel zur Auffindung der Geschwindigkeit ist: $v = 2\sqrt{g\,h}$, wo g den Fallraum in einer Secunde und h die Fallhöhe bedeutet. Diese Fallhöhe ist im vorliegenden Falle, wo von Widerständen nicht die Rede ist, unser f, und wir erhalten daher durch Substitution von f für h die Formel:

$$v = 2\sqrt{gf}$$
$$v = \sqrt{4gf}$$
$$v^2 = 4gf$$

und schliesslich $$f = \frac{v^2}{4g}.$$

Nun hatten wir bereits $w = av^2 + bv$ (§ 8). Substituiren wir diese Werthe von f und w in die Gleichung

$$H = f + w$$

so erhalten wir: $H = \frac{v^2}{4g} + av^2 + bv$.*)

Gesetzt also, man kennt nur H und v, so ist dies genügend, um f und w zu bestimmen, denn $\frac{v^2}{4g} = f$, und $H - \frac{v^2}{4g} = av^2 + bv = w$.

Wäre dagegen nur w und v in mehreren Beobachtungen gegeben, so würde man aus diesen zunächst die Coëfficienten a und b berechnen (§ 10). Dann hat man $av^2 + bv = w$ und $\frac{v^2}{4g} = f$, d. h. man hätte die beiden Glieder, deren Summe H gleichkommt.

Die Erkenntniss des gesetzlichen Verhältnisses von v zur Geschwindigkeitshöhe und Widerstandshöhe, verbunden mit der geringen Schwierigkeit, v zu messen, kommt uns also in der Weise zu statten, dass in den meisten Fällen die Berechnung der Werthe H, f und w aus v und dadurch die Benutzung der wichtigen Gleichung gesichert ist.

§ 16. Es liegt nahe zu fragen, was geschehe, wenn H sich ändere? Nothwendig müssen mit H die Werthe f und w gleichzeitig fallen und steigen. Die Nothwendigkeit liegt in dem Verhältniss von v zu f und w. Wenn v wächst, muss auch $\frac{v^2}{4g} = f$ wachsen, desgleichen $av^2 + bv^2 = w$, und folglich, da $f + w = H$, auch H. Aus gleichen Gründen wird mit Verminderung von v auch eine Abnahme der Werthe von f und w und folglich von H verbunden sein müssen. Diese theoretische Betrachtung wird durch die Erfahrung ohne Ausnahme gerechtfertigt.

---

*) Oder nach Gerstner $H = \frac{v^2}{4g} + \frac{4l}{d}\left(\alpha \frac{v^2}{4g} + \beta \frac{v}{\sqrt{d}}\right)$ vergl. § 13.

Indess kann man weiter fragen, ob mit Abnahme von H die Geschwindigkeitshöhe f oder die Widerstandshöhe w mehr sinke. Der Formel zu Folge muss Folgendes gelten:

$$\frac{f}{w} = \frac{\frac{v^2}{4g}}{av^2 + bv}$$

$$\frac{f}{w} = \frac{1}{4g} \cdot \frac{v^2}{av^2 + bv}$$

$$\frac{f}{w} = \frac{1}{4g} \cdot \frac{1}{a + \frac{b}{v}}$$

Da nun mit H gleichzeitig v abnimmt, so wird $\frac{b}{v}$ grösser, also $\frac{1}{a + \frac{b}{v}}$ kleiner, folglich die rechte Seite der Gleichung überhaupt, und ebenso $\frac{f}{w}$ kleiner. Hieraus ergiebt sich, dass die Geschwindigkeitshöhe in schnellerem Masse abnimmt, als die Widerstandshöhe.

Hiermit sind auch die Beobachtungen in Uebereinstimmung, wie die folgenden Tabellen ergeben. Nur bei sehr geringer Fallhöhe, und also sehr geringer Stromschnelle, habe ich Abweichungen von dem Gesetze bemerkt, und es muss vorläufig dahin gestellt werden, ob dies an einer Mangelhaftigkeit der Beobachtungen oder der Formel liege. So wenig ich die Zulänglichkeit der Formel für die ganze Breite möglicher Fälle selbst annehmen möchte, so muss ich doch bemerken, dass meine Experimente, bei sehr geringen Fallhöhen, verschiedene Zeichen der Unzuverlässigkeit an sich trugen.

Beobachtungsreihe I.

Länge der Röhre 500 Mill., Durchmesser 2,86.

H	f	w	$\frac{f}{w}$
2400	319,8	2080	0,1537
2200	291	1909	0,1524
2000	261,5	1739	0,1504
1800	232	1568	0,1480
1600	205	1395	0,1469
1400	178	1222	0,1457
1200	150	1050	0,1429
1000	122,6	877,4	0,1397
800	96	704	0,1364
600	73	527	0,1385

Beobachtungsreihe II.

Länge der Röhre 500 Mill., Durchmesser 1,578.

H	f	w	$\frac{f}{w}$
2000	176	1824	0,09649
1800	152	1648	0,09223
1600	127	1473	0,08622
1400	101	1299	0,07775
1200	78	1122	0,06952
1000	58	942	0,06157
800	39	761	0,05125
600	24	576	0,04166
400	9	391	0,02302
200	2	198	0,10101

Ist die Formel $H = \frac{v^2}{4g} + av^2 + bv$ zuverlässig, was, wie wir später zeigen werden, allerdings nur mit Einschränkungen gesagt werden kann, so lässt sich auch berechnen, in welchem Masse v und folglich auch w sich ändern müssen, wenn H sich ändert.

Setzen wir, H werde verändert um x, und bezeichnen wir die dann eintretende Stromschnelle mit v', so erhalten wir:

$$H = \frac{1}{4g} v'^2 + av'^2 + bv' = \frac{1}{4g} v^2 + av^2 + bv + x$$

$$\text{also } v'^2\left(\frac{1}{4g} + a\right) + bv' = v^2\left(\frac{1}{4g} + a\right) + bv + x$$

und wenn $\frac{1}{4g} + a = c$ gesetzt wird,

$$v'^2 + \frac{b}{c} v' = v^2 + \frac{bv + x}{c}$$

$$v' = -\frac{b}{2c} + \sqrt{v^2 + \frac{bv + x}{c} + \frac{b^2}{4c^2}}$$

Dass dieses Rechnungsverfahren in ziemlicher Breite anwendbar sei, beweist folgende Tabelle, in welcher die berechneten Werthe von v und die bei verschiedenen Fallhöhen beobachteten vergleichsweise neben einander gestellt sind. Die Versuche wurden mit einer Messingröhre von 500 Millimeter

Länge und 2,86 Millimeter Durchmesser angestellt. Die Berechnung der Widerstandscoëfficienten hatte ergeben $a = 0{,}000287$ und $b = 0{,}1177$ Millimeter. Die vierte Beobachtung, bei 1200 Millimeter Fallhöhe, ist als Ausgangspunkt der Rechnung benutzt worden.

Tabelle

über die gesetzliche Zunahme des Werthes v bei Zunahme des Werthes H in einer Messingröhre.

	Beobachtete Werthe			
Fallhöhe H	Widerstandshöhe w	Stromschnelle v	berechneter Werth v'	Differenz $v - v'$
600 Mill.	527 Mill.	1192 Mill.	1165,5	$-\frac{1}{45}$
800 »	704 »	1374 »	1370,6	$-\frac{1}{404}$
1000 »	878 »	1548 »	1551,4	$+\frac{1}{455}$
1200 »	1050 »	1715 »		
1400 »	1220 »	1866 »	1865,7	$-\frac{1}{6220}$
1600 »	1395 »	2001 »	2006	$+\frac{1}{400}$
1800 »	1568 »	2132 »	2137,6	$+\frac{1}{381}$
2000 »	1738,5 »	2261,6 »	2262	$+\frac{1}{5654}$
2200 »	1909 »	2384 »	2379,6	$-\frac{1}{542}$
2400 »	2080 »	2501 »	2493,3	$-\frac{1}{339}$

Die Uebereinstimmung der Rechnung mit der Erfahrung ist also eine sehr erfreuliche, und um so mehr anzuerkennen, als sie sich über eine nicht unbedeutende Breite verschiedener Druckkräfte erstreckt. Wie gross nun eigentlich diese Breite sei, lässt sich vorläufig nicht angeben, nur soviel ist klar, dass sie genau dieselben Grenzen haben werde, als die Beständigkeit der Widerstandscoëfficienten.

§ 17. Eine Frage von grösstem Interesse ist die, wie sich die Kraft, von welcher die Bewegung der Flüssigkeiten durch Röhren bedingt wird, zu den Widerständen verhalte, also die Frage nach dem Verhältnisse $\frac{H}{w}$.

Es wurde gezeigt, (§ 16), dass w mit H steige und falle, würden nun beide Werthe in gleicher Proportion verändert, so wäre $\frac{H}{w}$ eine constante Grösse, $= C$. Nichts könnte für die Hydrodynamik bequemer sein, als ein solches Verhältniss. Es würde dann genügen, durch einen genauen Versuch jene Constante zu ermitteln, um mit Hülfe derselben die zusammengehörigen Werthe H und f (und folglich auch v) für jeden beliebigen Widerstand w mathematisch zu bestimmen. Wenn nämlich

$$\frac{H}{w} = C$$

so wäre $Cw = H$

d. h. man erhielte durch Multiplication eines beliebigen Widerstandes mit der Constanten die Druckkraft H, welche als Summe der Widerstandshöhe und Geschwindigkeitshöhe erwiesen wurde. Da nun $H - w = f$ und wiederum $f = \frac{v^2}{4g}$, so erhielte man mit einer einzigen Beobachtung Aufschluss über alle möglichen Combinationen hydrodynamischer Kräfte, welche in einer gegebenen Röhre vorkommen könnten.

Leider ist $\frac{H}{w}$ keine unveränderliche Grösse, sondern steigt und sinkt mit H. Dies ergiebt sich theoretisch durch Umformung der Gleichung, von welcher ausgegangen wurde:

$$H = av^2 + bv + \frac{v^2}{4g}$$

$$\frac{H}{w} = \frac{av^2 + bv + \frac{v^2}{4g}}{av^2 + bv} \text{ (nach § 8)}$$

$$= \frac{av + b + \frac{v}{4g}}{av + b}$$

$$= 1 + \frac{\frac{v}{4g}}{av + b}$$

$$= 1 + \frac{1}{4ag + \frac{4bg}{v}}$$

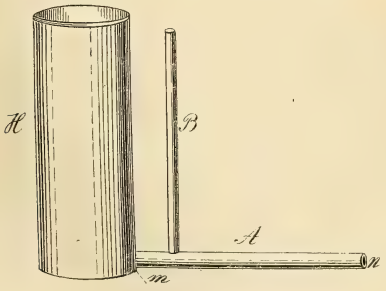
Nun sei der constante Werth $4ag = m$, und die Constante $4bg = n$, so ist:

$$\frac{H}{w} = 1 + \frac{1}{m + \frac{n}{v}}$$

Gesetzt also, v würde kleiner, so würde $\frac{n}{v}$ grösser; überhaupt würde der Nenner des Bruches grösser, der ganze Bruch dagegen kleiner, und folglich auch die rechte Seite der Gleichung kleiner, womit eine Verringerung des Werthes $\frac{H}{w}$ erwiesen ist. Eine Verkleinerung von v tritt aber ein, wenn H verringert wird; es ergiebt sich also schliesslich, dass der Formel zu Folge mit dem Steigen und Fallen des Werthes H auch ein Steigen und Fallen des Werthes $\frac{H}{w}$ eintreten sollte.

Die Erfahrung bestätigt dies nicht, wie sich aus nachstehenden Beobachtungen ergiebt, welche ich ausführlich mittheile, weil sie für die Kritik einer Formel wichtig scheinen, welche sich bisher als brauchbar und einflussreich ergeben hat.

Ich benutzte zu den Beobachtungen Röhren von 0,5 Meter Länge und verschiedenem Durchmesser, welche unmittelbar am Boden eines Wasserbehälters H in horizontaler Richtung angebracht wurden, wie A in der beistehenden Figur. Ein Druckmesser, B, wurde 100 Millimeter unterhalb der Einflussmündung



m angebracht, um zur Bestimmung des Widerstandes zu dienen.*) Der unmittelbar beobachtete Seitendruck wurde dann benutzt, um den Seitendruck an der Einflussmündung zu berechnen, welcher nach früheren Auseinandersetzungen dem Widerstande proportional ist. (§ 4 und § 6). In den Tabellen ist dieser Werth mit w bezeichnet. Da $H - w = f = \frac{v^2}{4g}$ ein Werth ist, welcher die Geschwindigkeit der Strömung zu schätzen gestattet, so habe ich in der letzten Columne die Grösse $H - w$ aufgenommen. Die Werthe H, w und $H - w$, wie auch die Durchmesser der Röhren, sind in Millimetern ausgedrückt.

Beobachtungsreihe I.

Zinnröhre von 9,86 Mill. Durchmesser.

H	w	$\frac{H}{w}$	$H-w$
887	402	2,21	485
828	376	2,20	453
771	352	2,19	419
715	327	2,19	388
659	302	2,18	357
602	277	2,17	325
548	252	2,17	296
493	227	2,17	266
438	202	2,17	236
381	177	2,15	204
326	152	2,14	174
272	127	2,14	145
218	102	2,14	116
164	77	2,13	87
109	52	2,10	57

Beobachtungsreihe II.

Zinnröhre von 6,98 Mill. Durchmesser.

H	w	$\frac{H}{w}$	$H-w$
870	487	1,79	383
803	450	1,78	353
758	425	1,78	333
710	400	1,77	310
665	375	1,77	290
617	350	1,76	267
547	312	1,75	235
475	275	1,73	200
431	250	1,72	181
360	212	1,70	148
293	175	1,67	118
228	137	1,66	91
160	100	1,60	60
97	62	1,56	35
65	44	1,48	21

*) D. h. S am Anfange der Röhre wurde für w genommen.

Beobachtungsreihe III.

Glasröhre mit 5,5 Mill. Durchmesser.

H	w	$\frac{H}{w}$	$H-w$
871	606	1,44	265
834	581	1,44	253
784	550	1,43	234
729	512	1,42	217
673	475	1,42	198
616	437	1,41	179
556	400	1,39	156
503	362	1,39	141
447	325	1,38	122
390	287	1,36	103
364	270	1,35	94
334	250	1,34	84
280	212	1,32	68
227	175	1,30	52
175	137	1,28	38
120	100	1,20	20
72	62	1,16	10

Beobachtungsreihe IV.

Messingröhre von 4,58 Mill. Durchmesser.

H	w	$\frac{H}{w}$	$H-w$
2353	1625	1,45	728
2263	1562	1,45	701
2150	1494	1,44	656
2069	1437	1,44	632
1969	1375	1,43	594
1884	1312	1,44	572
1785	1250	1,43	535
1694	1187	1,43	507
1604	1125	1,43	479
1513	1062	1,43	451
1425	1000	1,43	425
1330	937	1,42	393
1240	875	1,42	365
1149	812	1,42	337
1060	750	1,41	310
968	687	1,41	281
875	625	1,40	250
780	562	1,39	218
696	500	1,39	196
606	437	1,39	169
518	375	1,38	143
427	312	1,37	115
337	250	1,35	87

Beobachtungsreihe V.

Messingröhre von 2,86 Mill. Durchmesser.

H	w	$\frac{H}{w}$	$H-w$
2440	2000	1,220	440
2361	1937	1,219	424
2284	1875	1,218	409
2205	1812	1,217	393
2050	1687	1,215	363

Beobachtungsreihe VI.

Glasröhre von 2,04 Mill. Durchmesser.

H	w	$\frac{H}{w}$	$H-w$
900	725	1,24	175
885	709	1,25	176
870	696	1,25	174
830	654	1,27	176
800	625	1,28	175

H	w	$\frac{H}{w}$	$H-w$
1976	1625	1,216	351
1814	1494	1,214	320
1742	1437	1,212	305
1665	1375	1,211	290
1512	1250	1,210	262
1433	1187	1,207	246
1359	1125	1,208	234
1282	1062	1,207	220
1190	987	1,206	203
1056	875	1,207	181
977	812	1,203	165
825	687	1,201	138
751	625	1,202	126
678	562	1,206	116
600	500	1,200	105
540	437	1,236	103
485	375	1,293	110
342	250	1,368	92

H	w	$\frac{H}{w}$	$H-w$
750	584	1,28	166
700	537	1,30	163
650	497	1,31	153
600	469	1,28	131
550	449	1,23	101
500	406	1,23	94
450	377	1,19	73
400	344	1,16	56
350	309	1,13	41
300	272	1,10	28
250	236	1,06	14
200	181	1,10	19
150	145	1,03	5

Beobachtungsreihe VII.

Glasröhre von 1,94 Mill. Durchmesser.

H	w	$\frac{H}{w}$	$H-w$
2330	2125	1,09	205
2209	2000	1,10	209
2083	1875	1,11	208
1958	1750	1,12	208
1842	1625	1,13	207
1729	1500	1,15	229
1604	1375	1,17	229
1483	1250	1,19	223
1398	1125	1,24	273
1280	1000	1,28	280
1131	875	1,29	256
946	750	1,25	190
759	625	1,21	134
592	500	1,18	92
429	375	1,14	54

Beobachtungsreihe VIII.

Glasröhre von 0,75 Mill. Durchmesser.

H	w	$\frac{H}{w}$	$H-w$
883	875	1,01	8
799	787	1,01	12
726	704	1,03	22
650	624	1,04	26
575	544	1,06	31
485	451	1,08	34
371	339	1,09	32
330	292	1,13	38
278	241	1,15	37
206	169	1,22	37
175	139	1,26	36
120	80	1,50	40
79	38	2,08	42

Diese Beobachtungen beweisen, dass der Quotient $\frac{H}{w}$ durch Veränderung des Werthes H geringfügige Veränderungen erfahre, und zwar nicht immer in derselben Richtung des Steigens und Fallens wie H (was der Theorie nach vorausgesetzt werden musste), sondern bisweilen in der entgegengesetzten. Nach Massgabe der vorliegenden Beobachtungen ist wahrscheinlich, dass die Veränderungen des Werthes $\frac{H}{w}$ in jeder Röhre einen Wendepunkt oder deren mehrere haben, wo das Fallen desselben in ein Steigen umschlägt und umgekehrt. Die Ergebnisse der Beobachtungsreihen V, VI und VII lassen hierüber kaum einen Zweifel übrig, und man kann annehmen, dass diejenigen Beobachtungsreihen, wo der Werth $\frac{H}{w}$ gleichzeitig mit H stets fällt (wie in I und II), oder umgekehrt stetig steigt (wie in VIII), nur Fractionen einer Scala sind, welche jenen Wendepunkt nicht erkennen lassen, weil die Beobachtungen nicht weit genug verfolgt sind.

§ 18. Das Erhebliche der eben mitgetheilten Beobachtungen ist dies, dass sie auf eine Mangelhaftigkeit der Formel $H = \frac{v^2}{4g} + av^2 + b^2$ hinzuweisen scheinen.

Es ergab sich durch Ableitung:

$$\frac{H}{w} = 1 + \frac{1}{m + \frac{n}{v}} \quad (Gl.\ II.)$$

und wir folgerten hieraus (§ 17), dass $\frac{H}{w}$ gleichzeitig mit H falle, und zwar deshalb, weil gleichzeitig mit H die Stromschnelle $= v$ fällt. Wenn nun die Beobachtung beweist, dass mit sinkendem H der Werth $\frac{H}{w}$ nicht immer sinke, so ist nach *Gl. II* von folgenden beiden Fällen einer nothwendig. Entweder müsste nämlich v mit abnehmender Fallhöhe H bisweilen steigen, oder m und n sind keine constanten Werthe.

Was nun die Annahme anlangt, dass mit Verminderung der Fallhöhe die Stromschnelle wachse, so hat diese alle Wahrscheinlichkeit gegen sich. Zwar könnte man sagen, die Beobachtungen selbst sprächen für diese Annahme, denn $H-w$, also die Geschwindigkeitshöhe, steige bisweilen, wenn H sinke, und demnach müsse die Stromschnelle ebenfalls zunehmen. Man bemerke indess, dass in $H-w$ der Widerstand nur nach dem gemessenen Werthe des Seitendrucks bestimmt ist, und dass $H-w$ für die Geschwindigkeitshöhe nur dann substituirt werden kann, wenn die Identität von Widerstand und Seitendruck vollkommen erwiesen ist. Ich werde auf diesen Punkt zurückkommen und vorläufig nur wiederholen, dass die Abweichung der Beobachtungen von der Formel durch eine Zunahme der Stromschnelle bei vermindertem Drucke höchst wahrscheinlicher Weise nicht bedingt ist.

Demnach bliebe nur übrig, dass die Werthe m und n veränderlich wären. Da aber $m = 4ag$ und $n = 4bg$ (§ 17), so würde dies mit einer Veränderlichkeit der Coëfficienten a und b verbunden sein, welche in unserer Formel als Constanten vorausgesetzt wurden.

Wenn nun der bemerkte Widerspruch zwischen Theorie und Beobachtung zur Vorsicht beim Gebrauche der aufgestellten Formel auffordert, so wäre es ein gänzliches Missverständniss, dieselbe im Allgemeinen verwerfen zu wollen. Schon im Vorhergehenden sind unzweideutige Beweise ihrer Brauchbarkeit gegeben worden, und auch im Folgenden wird sich zeigen, dass sie zum Berechnen angenäherter Werthe oft vortreffliche Dienste leiste. Die Formel ist empirischer Natur, und die Breite der Fälle, für welche sie gelte, wird daher selbst wieder auf empirischem Wege zu ermitteln sein.

§ 19. Ich zeigte oben, welche ausserordentlichen Bequemlichkeiten für die Berechnung hydrodynamischer Verhältnisse entstehen würden, wenn $\frac{H}{w}$ ein constanter Werth wäre (§ 17). Ein

solcher ist nun zwar $\frac{H}{w}$ nicht, indess ist die Veränderlichkeit desselben in vielen Fällen so geringfügig, dass die erwähnten Bequemlichkeiten, obschon in beschränkterem Masse, doch eintreten. Ich werde zunächst Beispiele mittheilen, welche zeigen, dass $\frac{H}{w} w'$ annäherungsweise $= H'$, wo H' die zu w' gehörige Fallhöhe bezeichnet.

In einer Röhre von 9,86 Millimeter Durchmesser war bei einer Fallhöhe von 438 Mill. der Widerstand 202 Mill., folglich $\frac{H}{w} = 2{,}16$ (Beobachtungsreihe I, § 17). Multiplicirt man mit diesem Factor $w' = 402$, so erhält man 868,3 für H', statt des beobachteten Werthes 887. Multiplicirt man mit demselben Factor $w' = 52$, so erhält man 112,3 statt des beobachteten $H' = 109$.

In einer Röhre von 2,86 Millimeter Durchmesser ergab sich bei einer Fallhöhe von 1588 die Widerstandshöhe 1312, also $\frac{H}{w} = 1{,}21$. Multipliciren wir mit diesem Factor einen Widerstand (w') von 2000 Millimeter, so erhalten wir $H' = 527{,}6$, statt des beobachteten 540.

Bei Berechnung noch anderer Fälle meiner Tabellen wird man finden, dass in allen Beobachtungsreihen, mit Ausnahme von VIII, $\frac{H}{w} w'$ nahezu $= H'$ ist, vorausgesetzt allerdings, dass w und w' nicht allzuweit auseinander liegen.

Nennen wir die für ein beliebiges w' berechnete Druckhöhe H', so wird $H' - w' = f'$ sein, wo f' den angenäherten Werth der Geschwindigkeitshöhe bedeutet. Unleugbar ist, dass nach diesem Princip sich in manchen Fällen die Geschwindigkeit recht gut berechnen lasse. Als Beispiel diene Folgendes. In einer langen Röhre floss das Wasser mit einer Geschwindigkeit von 687 Millimeter, wozu eine Geschwindigkeitshöhe, f, von 24,14 Millimeter gehört. Die Widerstandshöhe, w, ergab sich durch den Druckmesser $= 254$ Millimeter. Da nun $f + w = H$, so

war $H = 278{,}14$ Millimeter und $\frac{H}{w} = 1{,}095$. In einer zweiten Beobachtung war $w = 326$, und $v = 806{,}7$. Untersuchen wir, wie weit diese durch Beobachtung gegebenen Werthe durch Rechnung darstellbar sind, so findet sich:

$$326 \,.\, 1{,}095 = H' = 356{,}99$$

ferner $356{,}99 - 326 = H - w = f' = \frac{v^2}{4g} = 30{,}99$

endlich $2\sqrt{g.\,30{,}99} = v' = 778{,}5$

welcher berechnete Werth dem beobachteten von 806,7 ziemlich nahe kommt, indem der Fehler $-\frac{1}{285}$ beträgt.

Ein ähnliches Resultat lieferten folgende Beobachtungen. Für eine Röhre von 500 Millimeter Länge und 7,03 Millimeter Durchmesser ergab sich $\frac{H}{w}$, bei einer Fallhöhe von 1178 Millimeter, $= 1{,}413$. Hiernach berechnet sich für einen Widerstand von 1108 Millimeter die Geschwindigkeit auf 2985, während die Beobachtung 3089 auswies, und für einen Widerstand von 364 Millimeter ergab die Rechnung 1715, die Beobachtung nur 1648.

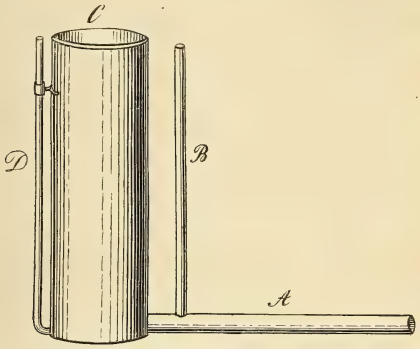
§ 20. Im Vorhergehenden wurde zwar der Seitendruck, S, für den Widerstand, w, genommen, aber doch nur da, wo die Abhängigkeit beider von einem und demselben Gesetze eine derartige Substitution zuliess. Ich habe nicht unterlassen anzugeben, dass Widerstand und Seitendruck, als statische Kräfte, sich keineswegs gleich sind. Das Verhältniss von $w : S$ bedarf aber um so mehr einer gründlichen Erörterung, als bei der Blutbewegung, deren physikalische Bedingungen untersucht werden sollen, die Grösse des Widerstandes nur durch Messung des Seitendrucks bestimmbar ist.

Die erste Andeutung, dass der Seitendruck geringer sei als der Widerstand, ergab sich aus den § 17 mitgetheilten Versuchen. Wir hatten $H = \frac{v^2}{4g} + w$

also $H - w = \frac{v^2}{4g} =$ der Geschwindigkeitshöhe.

Wäre $w = S$, so müsste auch $H - S$ die Geschwindigkeitshöhe geben, aber die Versuche zeigten, dass $H - S$ (wofür in den Tabellen $H - w$ steht) für die stattfindende Geschwindigkeit stets zu gross, also S stets zu klein war.

Um über den Unterschied $w - S$ Aufschluss zu erhalten, habe ich mit folgendem Apparate experimentirt. Am Boden eines



Wasserbehälters C von 2,5 Meter Höhe ist in horizontaler Richtung die Röhre A angebracht, welche zum Abfluss des Wassers dient. Auf dieser Röhre ist der Druckmesser B so aufgerichtet, wie früher schon bemerkt wurde. Mit dem Wasserbehälter communicirt aber ferner eine graduirte Glasröhre D, so dass, wenn der Behälter mit Wasser gefüllt wird, dieses in beiden communicirenden Apparaten gleich hoch stehen muss. Die Röhre D dient also zum Messen des Wasserstandes in C, oder zur Bestimmung des Werthes H.

Der Behälter C wurde durch einen schwimmenden Heber mit Wasser gespeist, in der Weise, dass der Abfluss genau ersetzt wurde, und folglich der Wasserstand im Behälter oder H während der Dauer eines Versuches unverändert derselbe blieb.

Nun liess sich direct beobachten die Kraft H, der Seitendruck

S und die Geschwindigkeit v. Indirect liess sich bestimmen w. Denn da $H = \frac{v^2}{4g} + w$, so war $w = H - \frac{v^2}{4g}$.

In einem Versuche combinirten sich aber folgende Werthe: $H = 1596$ Millimeter; $S = 866$; $v = 3089$; $w = 1117{,}1$ so dass die Differenz zwischen w und S im vorliegenden Falle 251,1 Millimeter beträgt. Nennen wir diese Differenz ς, so ist $w = S + \varsigma$. Demnach kann S für w nur in den Fällen substituirt werden, wo ς gegen S verschwindet, oder doch unbedeutend klein wird. Aus dem Gesagten ergiebt sich, wie wichtig es sei, das Verhältniss von $S : \varsigma$ zu prüfen und zu untersuchen, unter welchen Umständen der Bruch $\frac{\varsigma}{S}$ so klein werde, dass die Substitution von S für w unbedenklich erscheine.*)

Die nachstehenden Tabellen enthalten meine Beobachtungen über diesen Gegenstand; die Buchstaben in den Columnen-Ueberschriften haben dieselbe Bedeutung wie im Vorhergehenden. Die Werthe für L, H, S, v, w und ς sind in Millimetern ausgedrückt, die Werthe in den beiden letzten Columnen drücken nur Verhältnisse aus.

Beobachtungsreihe I.

Einfluss der Röhrenlänge L, auf die Werthe S und ς. Alle Röhren haben 7,03 Millimeter im Durchmesser.

L	H	v	S	w	ς	$\frac{\varsigma}{S}$	$\frac{H}{S}$
3000	885	1011	812	833	21	0,0258	1,09
2500	741	1011	662	689	27	0,0408	1,12
2000	595	1011	514	543	29	0,0564	1,16
1500	458	1011	373	406	33	0,0885	1,23
1000	333	1011	252	281	29	0,1151	1,32
500	206	1011	129	154	25	0,1938	1,59

*) Auch für die Physiologie ist diese Untersuchung wichtig. Da nämlich die Hämodynamik auf die Formel $H = \frac{v^2}{4g} + w$ zurückzukommen genöthigt ist, so bedarf es empirischer Bestimmungen für die Werthe v und w. Nun

Aus dieser Tabelle ergiebt sich, dass $\frac{\varsigma}{S}$ um so kleiner wird, je länger die Röhre ist. Bei ausserordentlich langen Röhren würde der Werth von ς ganz ausser Betracht fallen, und folglich die Substitution von S für w zulässig werden. Berücksichtigt man nun, dass mit der Länge der Röhren der Widerstand wächst, so liegt in den mitgetheilten Erfahrungen die Andeutung, dass mit Zunahme der Widerstände der Werth ς an Wichtigkeit verlieren und die Gleichung $w = S + \varsigma$ in die $w = S$ übergehe.

Zur Beurtheilung der Wichtigkeit des Gliedes ς dient am besten der Quotient $\frac{H}{S}$. Je geringer dieser unechte Bruch wird, indem er sich der Einheit nähert, um so geringer wird auch der Einfluss von ς.

Beobachtungsreihe II.

Einfluss der Röhrenweite auf die Werthe S und ς. Alle Röhren haben die Länge von 500 Mill.

Durchmesser	H	v	w	ς	S	$\frac{\varsigma}{S}$	$\frac{H_1}{S}$
11,66	274	1336	182,7	56,7	126	0,450	2,18
9,78	292	1336	200,7	51,7	149	0,347	1,96
7,03	370	1336	278,7	52,7	225	0,234	1,64
5,44	389	1336	297,7	51,7	246	0,210	1,58
4,59	516	1336	424,7	50,7	374	0,136	1,38
2,86	809	1336	717,7	54,7	663	0,082	1,22

Die Tabelle zeigt, dass der Quotient $\frac{\varsigma}{S}$ mit Verengerung der Röhren abnehme. Da nun Verengerung der Röhren mit Vermehrung der Widerstände verbunden ist, so bestätigt sich die im Vorigen gemachte Erfahrung, dass mit Zunahme der Widerstände der Werth ς an Einfluss verliere. Auch hier ist der

lässt sich aber w direct nicht messen, sondern nur der Seitendruck S, indem, wie später zu zeigen, die Hämadynamometer-Messungen den Werth $w - \varsigma = S$ ergeben.

Bruch $\frac{H}{S}$ zur Beurtheilung des Werthes brauchbar, das heisst, das mit ς bezeichnete Widerstandsmoment macht sich um so weniger geltend, jemehr sich $\frac{H}{S}$ der Einheit nähert.

Beobachtungsreihe III.

Einfluss der Stromschnelle auf die Werthe S und ς.
Die Messingröhre ist 500 Millimeter lang und von 1,578 Millimeter Durchmesser.

H	v	S	w	ς	$\frac{\varsigma}{S}$	$\frac{H}{S}$
2000	1853	1625	1824	199	0,122	1,23
1800	1726	1471	1648	177	0,120	1,22
1600	1576	1321	1473	152	0,115	1,21
1400	1406	1167	1299	130	0,113	1,20
1200	1236	1016	1122	106	0,104	1,18
1000	1065	861	942	81	0,094	1,16
800	878	702	761	59	0,084	1,11
600	682	539	576	37	0,069	1,11
400	430	365	391	26	0,071	1,09
200	190	192	198	6	0,031	1,04

Man sieht, dass ς im Verhältniss zu S um so geringfügiger wird, jemehr v abnimmt, und zum dritten Mal bewährt es sich, dass die Brüche $\frac{\varsigma}{S}$ und $\frac{H}{S}$ gleichzeitig sinken. Nun sinkt aber mit $\frac{H}{S}$ gleichzeitig auch $\frac{H}{w}$, d. h. w wird im Verhältniss zu H grösser. Da nun $H = w + f$, so kann w im Verhältniss zu H nur auf Unkosten von f wachsen. Dies heisst mit anderen Worten: Je kleiner $\frac{H}{w}$ und mit ihm $\frac{H}{S}$ wird, um so mehr consumiren die Widerstände von der Kraft H, welche die Aufgabe hat, sowohl die Widerstände zu besiegen, als eine Strömung von gewisser Schnelligkeit hervorzubringen. Das Resultat, in welchem alle Beobachtungen übereinstimmen, ist also dies: das Glied ς wird in der Gleichung

$$w = S + \varsigma$$

um so bedeutungsloser, je geringer die Geschwindigkeitshöhe im Verhältniss zur Widerstandshöhe ausfällt.

Dieses Ergebniss ist für die Hämostatik von grosser Wichtigkeit, indem nur von diesem Standpunkte aus die Benutzung des Hämodynamometers sich rechtfertigen lässt, was alle Beobachter bisher übersehen haben.

Käme es darauf an zu ermitteln, von welchen Umständen ς abhängt, so würde ein besonderes Gewicht auf die Erfahrung zu legen sein, dass bei gleicher Stromschnelle sein Werth in den verschiedensten Röhren derselbe ist (nach Beobachtungsreihe I und II) Für die physiologischen Zwecke scheint diese Untersuchung überflüssig, und so bemerke ich nur noch, dass der eben gefundene Unterschied zwischen w und S einen Einfluss auf die ersten Paragraphen dieses Abschnittes ausübt, wo das Verhältniss des Widerstandes zur Länge und Weite der Röhren zur Sprache kam. Indem dort der Widerstand am Seitendruck gemessen wurde, sind die gefundenen Zahlenwerthe eben nur für den Seitendruck und nicht für den Widerstand gültig.

§ 21. Ich werde nun die wesentlichsten Ergebnisse der vorhergehenden Untersuchung in möglichst kurze Sätze und, wo es angeht, in Formeln zusammendrängen. Es sei wie im Vorhergehenden

H die Druckkraft, welche ein Fluidum durch eine Röhre treibt;

f die Kraft, welche nöthig, um dem Fluidum seine Geschwindigkeit zu geben;

w die Kraft, welche zur Gewältigung der Widerstände erforderlich ist;

v die Geschwindigkeit der Bewegung in 1 Secunde;

l die Länge der Röhre;

d der Durchmesser der Röhre;

S der Seitendruck, welchen die strömende Flüssigkeit auf die Röhrenwandung ausübt.

1) Der Seitendruck ist eine Folge der zwischen dem Fluidum und den Röhrenwandungen vorkommenden Adhäsion und Reibung.

2) Der Werth des Seitendruckes an einem bestimmten Punkte der Röhre ist proportional dem Widerstande, welchen die Bewegung des Wassers an eben diesem Punkte zu überwinden hat.

3) Die Werthe des Seitendrucks an verschiedenen Punkten einer gleichmässig weiten Röhre verhalten sich umgekehrt wie deren Entfernungen von der Ausflussmündung.

4) Das Verhältniss $\frac{l}{S}$ scheint constant zu sein.

5) Der Seitendruck verhält sich nahezu umgekehrt, wie der Durchmesser der Röhren, doch wächst Sd mit abnehmender Weite derselben.

6) $f = \frac{v^2}{4g}$.

7) $w = av^2 + bv = \frac{4l}{d}\left(\alpha\,\frac{v^2}{4g} + \beta\,\frac{v}{\sqrt{d}}\right)$.

8) $H = f + w = \frac{v^2}{4g} + av^2 + bv.$

$$= \frac{v^2}{4g} + \frac{4l}{d}\left(\alpha\,\frac{v^2}{4g} + \beta\,\frac{v}{\sqrt{d}}\right).$$

9) $v = -\frac{b}{2a} + \sqrt{\frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2}{4} + \frac{w}{a}}$

$$= -\frac{2\beta g}{\alpha\sqrt{d}} + \sqrt{\frac{g\,(4\beta^2 gl + awd^2)}{\alpha^2 d\,l}}.$$

10) v fällt und steigt mit H; verändert sich H um $\pm\, x$, und setzt man $\frac{1}{4g} + a = c$, so findet man die veränderte Geschwindigkeit v' nach der Formel:

$$v' = -\frac{b}{2c} + \sqrt{v^2 + \frac{bv \pm x}{c} + \frac{b^2}{4c^2}}.$$

11) $S'd' + \left(\frac{n}{\sqrt{d}} - \frac{n}{\sqrt{d'}}\right) = Sd$ (wo $n = 4\beta lv$).

12) Da $\frac{H}{w} = 1 + \frac{1}{m + \frac{n}{v}}$, so sollte $\frac{H}{w}$ mit H stets abnehmen, weil v mit H stets abnimmt. Die Beobachtung lehrt, dass auch das Gegentheil vorkomme, was auf eine Mangelhaftigkeit der unter 8 aufgeführten hydrostatischen Formeln hinweist.

13) $\frac{H}{w}$ verändert sich beim Fallen und Steigen von H so wenig, dass es fast als Constante gelten kann. Hierauf beruht es, dass $\frac{H}{w} w' = H^0$ nahezu $= H'$ (wo H' die zu w' gehörige Fallhöhe bedeutet), und $H^0 - w' = f^0$ nahezu $= f'$, in welchem Falle mit f' die Geschwindigkeitshöhe gemeint ist, aus welcher v' berechnet werden kann.

14) $S = w - \varsigma$, wo S den Seitendruck am Anfange der Röhre bedeutet.

15) Der Werth ς ist um so unbedeutender, je mehr sich der unechte Bruch $\frac{H}{w}$ der Einheit nähert, oder je kleiner $\frac{f}{w}$.

§ 22. Die bisher mitgetheilten Beobachtungen sind sämmtlich an Röhren angestellt worden, welche zum Mindesten einige Millimeter im Durchmesser hatten. Nur für solche Röhren, nicht für Capillarröhren sind die im vorigen Paragraphen zusammengestellten Formeln gültig.

Es ist wichtig die Frage aufzuwerfen, in wiefern die Bewegung der Flüssigkeiten in Röhren von sehr kleinem Durchmesser besonderen Gesetzen folge. Hierüber hat *Poiseuille* eine Reihe vortrefflicher Untersuchungen angestellt, deren Resultate sich bei einer sorgfältigen Prüfung von Seiten der Pariser Academie vollständig bestätigt haben.*) Er fand, was früher schon *Girard* für Capillarröhren behauptet, dass $\frac{Hd}{lv}$ ein constanter Werth sei; hieraus ergeben sich von selbst folgende Sätze:

1) Bei unveränderlichem Drucke (oben durch die Fallhöhe

*) Poggendorfs Annalen 1843, Seite 424.

H bezeichnet) und constanter Länge der Röhren verhält sich die Stromschnelle wie der Diameter.

2) Bei gleichen Durchmessern und Längen verhalten sich die Geschwindigkeiten wie die Drucke oder Fallhöhen.

3) Bei gleichem Drucke und gleichem Durchmesser verhält sich die Stromschnelle umgekehrt wie die Länge der Röhre.

Es ist zu bemerken, dass alle diese Gesetze unterhalb einer gewissen Länge der Röhre ihre Gültigkeit verlieren, und dass, je enger die Röhren sind, um so kürzere Abschnitte den eben erwähnten Gesetzen Folge leisten.*)

Um zu zeigen, in wie weit sich die Bewegung der Flüssigkeiten in Capillarröhren von der in weiteren Röhren entfernt, werde ich von einer empirischen Formel ausgehen, welche *Poiseuille* aufgestellt, und welche sich für sehr feine Röhren von 0,65 bis 0,015 Millimeter Durchmesser als vollkommen brauchbar erweist. Er fand:

$$v = \frac{Hd^2}{Bl}, \text{ wo } B \text{ einen Coefficienten bezeichnet.}$$

Nun war nach *Gerstner* (§ 13)

$$H = \frac{v^2}{4g} + \frac{4l}{d}\left(\alpha v^2 + \beta \frac{v}{\sqrt{d}}\right)$$

$$H = \frac{v^2}{4g} + \alpha \frac{4lv^2}{d} + \beta \frac{4lv}{d^{\frac{3}{2}}}$$

Sollte diese für weitere Röhren sehr brauchbare Formel auf sehr enge angewendet werden, so würde das Glied $\frac{v^2}{4g}$, welches die Geschwindigkeitshöhe ausdrückt, als gänzlich unbedeutend beseitigt werden dürfen, und es bliebe, wenn $4\alpha = A$ und $4\beta = B$,

$$H = A\frac{lv^2}{d} + B\frac{lv}{d^{\frac{3}{2}}}$$

*) Hiernach ist wahrscheinlich, dass auch weite Röhren, wenn sie nur hinreichend lang wären, dieselben Verhältnisse ergeben würden.

$$\text{oder } \frac{Hd}{lv} = Av + \frac{B}{\sqrt{d}}$$

Nun ist erfahrungsmässig $\frac{Hd}{lv}$ constant, also $A = 0$, und folglich

$$\frac{Hd}{lv} = \frac{B}{\sqrt{d}}$$

$$Hd\sqrt{d} = Blv$$

$$\frac{Hd^{\frac{3}{2}}}{Bl} = v$$

woraus sich ergiebt, dass wir nach Gerstner $d^{\frac{3}{2}}$ erhalten würden, wo *Poiseuille* d^2 hat. Es lässt sich also für Röhren von sehr verschiedener Weite nicht ein und dieselbe hydrodynamische Formel aufstellen, indem, mit allmäliger Verengerung der Röhren, der Werth d in immer höherer Potenz auftreten und endlich, in Capillaren, bis auf d^2 steigen muss. Diese Veränderlichkeit im Einflusse des Durchmessers auf den Widerstand hat nichts Befremdliches, sobald man bedenkt, dass die durch Adhäsion gehemmten Wassertheilchen nicht blos an ihrer Berührungsfläche mit der Röhre, sondern in ihrer Totalität gehemmt werden müssen. Haben nun diese Theilchen eine messbare Grösse, so hat auch die gehemmte Schicht des durch die Röhre strömenden Wassers eine messbare und bestimmte Dicke. Unter diesen Umständen leuchtet von selbst ein, dass der Effect der Hemmung in engen Röhren unverhältnissmässig grösser als in weiten sein müsse. In den engsten Capillaren würden sich die gehemmten Wasserschichten in der Röhrenaxe berühren, und die Adhäsion würde nicht blos einen Theil der Wassermasse, sondern das Ganze betreffen.

Dieses Ueberwiegen der Adhäsion in den Capillaren ist nun wohl auch der Grund, dass der Widerstand in Capillaren nur der Geschwindigkeit, nicht auch dem Quadrate der Geschwindigkeit proportional ist. Nach früheren Erörterungen (§ 8) bezieht sich das Geschwindigkeitsquadrat der Formel auf den Theil

des Widerstandes, welcher vom Stosse abhängt, aber bei der ausserordentlich langsamen Strömung in Capillaren verschwindet dieses Moment neben dem der Adhäsion in dem Grade, dass es nicht mehr in Rechnung kommt.

§ 23. Es kann hier noch nicht gezeigt werden, welche Anwendung die aufgestellten Lehrsätze auf die Physiologie des Blutkreislaufs im Einzelnen haben, nur im Allgemeinen ist anzudeuten, dass die Prinzipien der Hydrodynamik bei der Bewegung des Blutes durch die Adern nicht ohne Einfluss bleiben können. Es versteht sich von selbst, dass die Blutflüssigkeit beim Durchgang durch die Gefässe auf Widerstände stosse, welche durch eine Kraft überwunden werden müssen, die den Widerständen entspreche. Nennen wir diese Kraft auch hier w. Da nun die Widerstände, welche der Blutbewegung entgegenstehen, mechanischer Natur sind, so gilt auch für die Kraft, welche sie überwindet, die mechanische Formel $w = av^2 + bv$.

Es ist ferner einleuchtend, dass die Geschwindigkeit, mit welcher das Blut fliesst, von einer Kraft ausgehen müsse, die, von welcher Art sie auch sein möge, ihrem Effecte nach doch einer mechanischen Kraft vergleichbar sei. Wir werden diese Kraft f nennen und auf eine Fallhöhe zurückführen, welche zur Production der gegebenen Blutgeschwindigkeit geeignet ist. In diesem Falle ist $f = \frac{v^2}{4g}$ wie in der Hydrodynamik. Endlich muss im Körper eine Kraft H vorhanden sein, welche das Blut mit einer solchen Kraft in die Arterien treibt, dass der Widerstand überwunden, und noch überdies das Blut mit einer gewissen Geschwindigkeit fortbewegt werde. Es ist vollkommen gleichgültig, ob diese Kraft nur von dem mechanischen Impulse des Herzens oder von irgend welcher Lebenskraft ausgehe, immerhin muss sie der Wirkung nach eine mechanische Schätzung zulassen, um so mehr, da $f + w$, d. h. die Summe ihrer Leistungen, eine mechanische Schätzung ebenfalls zulässt. Auf diese

Weise rechtfertigt sich der Gebrauch der Gleichung $H = \frac{v^2}{4g} + av^2 + bv$ im Gebiete der Hämodynamik.

Hieran knüpfen sich wichtige Folgen. Ist einmal die Formel für die physikalischen Verhältnisse der Blutbewegung bindend, so findet auch ein gesetzliches Verhältniss zwischen den Werthen H, w, f und v statt. Man darf nun nicht mehr annehmen, dass die Lebenskraft aus weiser Absicht einen verderblichen Blutdruck mindern und gleichzeitig die Blutgeschwindigkeit vermehren könne, und doch sind derartige Anmuthungen an die Autokratie der Lebenskraft nicht selten gemacht und damit beschönigt worden, dass die organischen Kräfte nach vernünftigen Zwecken handeln.

Soll eine derartige Teleologie Stand halten, so muss man sie mit der Betrachtung verbinden, dass für die Lebenskraft nur solche Zwecke als vernünftig gelten, welche ohne Verletzung der physikalischen Gesetze erreichbar sind.

Cap. II.

Von der Bewegung der Flüssigkeit durch starre Röhren von ungleicher Weite oder winkliger Richtung.

---

§ 24. In einer Röhre von ungleichmässiger Weite ist die Stromschnelle in den verschiedenen Abschnitten derselben eine verschiedene und verhält sich im Allgemeinen umgekehrt wie ihre Weite, vorausgesetzt, dass die Flüssigkeit die Röhre vollkommen ausfüllt.

Gesetzt, die Röhre $R\,R'$ sei so beschaffen, dass der Abschnitt a halb so weit sei,

als der gleich lange b, und gesetzt ferner, die Kraft f, welche das Fliessen vermittelt, bleibe unveränderlich dieselbe, so ist klar, dass die Wassermasse, welche in einer Secunde a füllt, den Abschnitt b in der zweiten Secunde nur halb füllen werde, d. h. die Flüssigkeit bewegt sich in derselben Zeit durch die ganze Länge des Abschnitts a, aber nur durch die halbe Länge des Abschnitts b. Hiernach versteht es sich ganz von selbst, dass auch in einem Blutgefässe von ungleicher Weite die Strömung eine verschiedene Schnelligkeit haben müsse. Bereits Haller und Spalanzani beobachteten an den durchsichtigen Adern des Gekröses, dass das Blut an erweiterten Stellen derselben langsamer, an verengten dagegen schneller fliesse.

§ 25. Um zu erfahren, wie schnell die Flüssigkeit in irgend einem Abschnitte einer Röhre fliesse, wird man das Volumen des Wassers, welches in einer Secunde abfliesst, bestimmen und mit der Durchschnittsfläche des betreffenden Röhrenabschnitts dividiren müssen. Hiermit erhält man v. Bezeichnet man die Stromschnelle an der Einflussöffnung der Röhre mit v', so erhält man durch $\frac{v'^2}{4g}$ die Geschwindigkeitshöhe, f, welche dieses v' in Anspruch nimmt. Da nun dieselbe Kraft, welche genügt, die Flüssigkeit durch die Einflussmündung zu bewegen, überhaupt genügen muss, dieselbe durch die Röhre (obschon nach Massgabe der Weite mit verschiedener Geschwindigkeit) zu bewegen, so ist das so gefundene f für alle Abschnitte gültig und durchaus dasselbe, welches wir in der Formel $H = f + w$ zur Erklärung der hydrodynamischen Verhältnisse nöthig haben.

§ 26. Kennt man H, so kennt man durch $H - f$ auch w. Kennt man H nicht, so wird w angenähert erhalten, wenn man

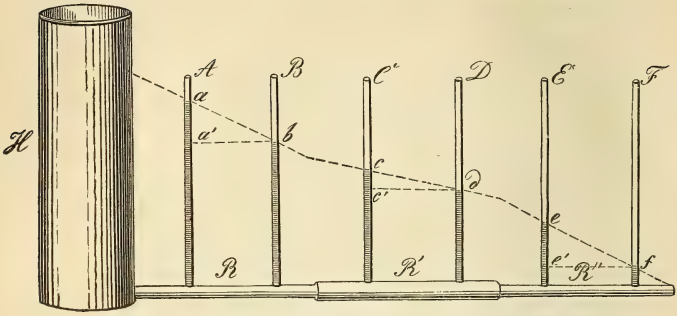
den Seitendruck am Anfange der Röhre misst und für w substituirt (§ 20).

§ 27. Wenn man an einer Röhre von ungleichem Kaliber Druckmesser anbringt, so findet sich, dass der Seitendruck im Allgemeinen von der Einflussmündung gegen die Ausflussmündung abnimmt. Diese Regel erleidet Ausnahmen, wenn das Fluidum aus einem weiten Röhrenabschnitte plötzlich in eine enge übergeht, in welchem Fall der Seitendruck nahe vor der verengerten Stelle eine Steigerung erfährt. Offenbar ist dies dieselbe Erscheinung, welche an Wasserwehren die Stauung veranlasst.

Theoretisch wird das Phänomen dadurch verständlich, dass die verengte Stelle der Röhre ein Hemmniss erzeugt, welches, wie jede Widerstandsursache, Druck zur Folge hat. Dieser Druck entsteht am Orte der Hemmung, also local, und würde sich über alle Wassertheilchen nach dem Anfang der Röhre hinwärts gleichmässig ausbreiten müssen, wenn das Wasser still stände. Indess findet ein Fliessen statt, und da die Mittheilung des Druckes Zeit verlangt, so können die Wassermoleküle, welche den Druck der angestauten Theile mit überkommen sollten, sich durch Fortbewegung demselben theilweise entziehen.

§ 28. Aber auch abgesehen von den Erscheinungen der Stauung, ist die Abnahme des Seitendrucks in Röhren von ungleichmässiger Weite eine sehr eigenthümliche. Die Widerstandshöhen liegen nämlich nicht sämmtlich in einer geraden Linie, welche von der Ausflussöffnung gegen die Einflussöffnung allmälig aufsteigt, wie wir dies in gleichmässig weiten horizontalen Röhren gesehen haben, sondern die Widerstandshöhen bilden eine Curve, welche unter dem Einfluss der respectiven Weite der verschiedenen Röhrenabschnitte steht.

Die Curve senkt sich gegen die Ausflussmündung der ungleich weiten Röhren in den engeren Abschnitten rascher, in den weiteren Abschnitten langsamer. Dies wird durch nachstehende Figur versinnlicht, in welcher die Linie *abcdef* die Curve des Seitendrucks bedeutet.



Ein solches Verhältniss des Seitendrucks musste im Voraus erwartet werden. In den engen Röhrenabschnitten ist die Strömung schneller (§ 24), und der Seitendruck ist eine Function der Geschwindigkeit. Hiernach muss, unter Voraussetzung gleicher Länge der Röhrenabschnitte, in den engen Abschnitten mehr Seitendruck entstehen, als in den weiten, und folglich muss auch die Curve des Seitendruckes vom Anfange eines solchen Abschnittes gegen dessen Ende einen stärkeren Abfall haben. Hiermit ist schon angedeutet, dass die Curve unter dem Einfluss der Formel $w = av^2 + bv$ stehen müsse.

§ 29. Um die Curve des Seitendrucks und durch diese die Abwandlung der Widerstände in ungleichmässig weiten Röhren genauer kennen zu lernen, bediente ich mich des Apparats, welcher in vorstehender Figur abgebildet ist. Die horizontale Röhre, durch welche das Wasser eines stets voll erhaltenen Behälters, H, abfloss, bestand aus drei Abschnitten $R\,R'\,R''$, von gleicher Länge, 0,5 Meter, aber ungleicher Weite. Es betrugen nämlich die Durchmesser in R 7,03, in R' 9,78, in R'' 6,93 Millimeter. Auf jedem Abschnitte waren zwei Druckmesser in der Weise angebracht, dass die Distanz derselben in allen Abschnitten denselben Werth von 300 Millimeter hatte. Nun steht das Wasser in jedem ersten Druckmesser eines Röhrenabschnittes

höher als in dessen zweitem; z. B. in A um a, a' höher als in B; in C um c, c' höher als in D, und diese Seitendrucksdifferenzen entsprechen dem Widerstande, welcher in dem betreffenden Röhrenabschnitt auf einem Längenraum von 300 Millimeter (gleich der Distanz der beiden Druckmesser unter einander) statt findet. Wir können demnach die Seitendrucksdifferenz für w in die Formel $w = av^2 + bv$ einführen und können, wenn wir vorläufig auch v (nach § 25) für jeden Röhrenabschnitt bestimmt haben, nachrechnen, ob die Seitendrucksdifferenzen und, wenn diese, natürlich auch der Gang der Curve durch das gesetzliche Verhältniss des Widerstandes zur Geschwindigkeit bedingt ist.

Ein Experiment gab folgende Resultate:

Beobachtung.	Seitendruckwerthe in den Druckmessern nach Millimetern.						Stromschnelle v in den Röhrenabschnitten nach Millimetern.		
	A	B	C	D	E	F	R	R'	R''
1.	621	457	445	410	239	64	1540	793	1589
2.	468	345	333	307	177	49	1318	679	1360
3.	348	256	246	227	131	37	1115	574	1150
4.	240	178	170	157	91	?	914	471	949

Berechnet man aus den eben angegebenen Druckhöhen die Seitendrucksdifferenzen a,a'; c,c'; e,e'; als Werthe des Widerstandes in den drei Röhrenabschnitten $R\ R'\ R''$, so ergiebt sich in dem Abschnitte:

Beobachtung.	R		R'		R''	
	w	v	w	v	w	v
1.	164	1540	35	793	175	1589
2.	123	1318	26	679	128	1360
3.	92	1115	19	574	94	1150
4.	62	914	13	471	?	949

Mit Hülfe der Gerstnerschen Formel lässt sich zeigen, dass diese Combination der Widerstände mit den Geschwindigkeiten eine gesetzlich nothwendige ist. Wir hatten (§ 12):

$$w = \frac{4l}{d}\left(\alpha v^2 + \beta \frac{v}{\sqrt{d}}\right) \ldots . \text{ (Gl. I)}$$

$$w = \frac{4l\alpha}{d}\ v^2 + \frac{4l\beta}{d\sqrt{d}} v \ldots \text{ (Gl. II)}$$

und wenn $4l\alpha$ mit m und $4l\beta$ mit n bezeichnet wird,

$$w = \frac{m}{d}\ v^2 + \frac{n}{d^{\frac{3}{2}}}\ v \ldots . \text{ (Gl. III)}$$

Gehen wir auf die einfachere Formel zurück:

$$w = av^2 + bv$$

so ist $a = \frac{m}{d}$, also $m = ad$

ferner $b = \frac{n}{d^{\frac{3}{2}}}$, also $n = bd^{\frac{3}{2}}$.

Ich habe nun für die im Vorstehenden mitgetheilten Beobachtungen über die zusammengehörigen Werthe von w und v zunächst die Coefficienten a, b nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet, und habe aus diesen die Werthe für die Constanten m und n entwickelt. Es fand sich:

$m = log\ 0{,}62289 - 4$ also Nr. 0,00041966,
$n = log\ 0{,}59193 - 3$ also Nr. 0,0039078.

Ist diese theoretische Betrachtung haltbar, so muss sich mit Hülfe dieser Constanten und nach Anleitung von Gleichung *III* aus der beobachteten Geschwindigkeit der zugehörige Widerstand berechnen lassen. Ich habe diese Rechnung ausgeführt und die berechneten Widerstandswerthe mit den beobachteten tabellarisch zusammengestellt. w' bezeichnet den berechneten Widerstand.

Vergleich

der beobachteten und theoretisch bestimmten Seitendruckswerthe in einer Röhre von ungleichem Kaliber.

	Abschnitt R		Abschnitt R'		Abschnitt R''	
	w'	w	w'	w	w'	w
1.	164,3	164	36,9	35	176,7	175.
2.	123,2	123	28,3	26	132,4	128.
3.	90,6	92	21,3	19	97,3	94.
4.	63,4	62	15,4	13	68,8	?

§ 30. Die unter den gegebenen Bedingungen höchst befriedigende Uebereinstimmung der berechneten Zahlen mit den beobachteten beweist, dass unsere Theorie über die Widerstandsverhältnisse in ungleich weiten Röhren genügenden Aufschluss giebt. Nun sollte diese Theorie auch den Gang der Seitendruckcurve verständlich machen. Dies bewährt sich indess nicht, wie aus Folgendem ersichtlich wird.

Der Druckmesser B des ersten Röhrenabschnitts steht 100 Millimeter vor dem Anfange des zweiten Röhrenabschnitts; zwischen A und B beträgt die Seitendruckdifferenz für eine Röhrenstrecke von 300 Millimeter Länge in der ersten Beobachtung 164 Millimeter, folglich sollte die Seitendruckdifferenz für eine Strecke von 100 Millimeter 54,3 Millimeter betragen (vergl. § 6). Nun war der Seitendruck in $B = 457$ Millimeter, er sollte demnach am Ende des ersten Röhrenabschnitts $= 457 - 54{,}3 = 402{,}7$ Millimeter sein. Eben so gross muss natürlich der Druck im Anfange des zweiten Röhrenabschnitts erwartet werden.

Im zweiten Abschnitte R' war die Seitendruckdifferenz auf eine Strecke von 300 Millimeter $= 35{,}4$, folglich muss sie für eine Strecke von 100 Millimeter betragen: 11,66 Millimeter. Der Druckmesser von C steht aber 100 Millimeter unter dem Anfangspunkte von R', folglich verlangt die Theorie für den An-

fangspunkt von R' einen Seitendruck von $445 + 11{,}66 = 456{,}66$ Millimeter. Es werden also für denselben Punkt, nämlich Endpunkt der ersten und Anfangspunkt der zweiten Röhre, einmal 402,7 und dann wieder 456,66 Millimeter Druck verlangt.

Dieser Widerspruch im Resultate der Rechnung beweist nichts, als dass in Röhren von ungleichem Kaliber, nahe an der Stelle, wo der Durchmesser sich ändert, die Abnahme des Seitendrucks nicht der Länge des Röhrenabschnitts proportional ist.

Im vorliegenden Falle kann dieses Ergebniss befremdlich erscheinen, da zwischen den Durchmessern B und C eine Stauung nicht statt findet, welche Umänderungen der normalen Druckverhältnisse bedingen könnte. Indess dürfte das, was hier vorgeht, der reine Gegensatz der Stauung sein, und eben deshalb auch den entgegengesetzten Effect haben müssen. Das Wasser fliesst aus einer engen Röhre in eine weite, erfährt also im Bezug auf's Fliessen nicht eine Hemmung, sondern eine Förderung, und wenn die Hemmung des Stroms eine locale Steigerung des Drucks veranlasst, so ist von der Förderung des Fliessens eine locale Verminderung des Drucks zu erwarten. Dem Versuche nach ist nun wirklich der Druck am Ende der ersten Röhre geringer, als am Anfange der zweiten, ein Verhältniss, auf welches wir öfters unter gleichen Bedingungen stossen werden, und welches mit dem Namen negative Stauung bezeichnet werden mag.

In einem zweiten Versuche richtete ich den Apparat so ein, dass der erste und letzte Röhrenabschnitt (also R und R') einen Durchmesser von 9,78 Millimetern, dagegen der mittlere (also R') den geringeren Diameter von 7,03 Millimeter hatte. Nun betrug die Druckdifferenz in dem weiten Röhrensegmente, R, 15,5 Millimeter, in dem nächstfolgenden R', dagegen 99 Millimeter, was wiederum der Theorie entspricht; denn da der Beobachtung zu Folge die Stromschnelle im weiten Abschnitte = 588,1 Millimeter, dagegen im zweiten und engeren = 1142 Millimeter be-

BOSTON MEDICAL
DEC 3 1918

trug, so musste in letzterer auch die Druckdifferenz eine sehr viel grössere sein.

§ 31. Wenn die Röhre von der geraden Linie abweicht und einen Winkel bildet, so wird der Strom des Wassers an die Röhrenwandung anstossen und eine Hemmung erfahren. Stellt man sich die gerade Röhre als die Summe zweier rechten Winkel $= 180°$ vor, so darf man voraussetzen, dass der Widerstand, welchen eine in Winkel gelegte Röhre dem durchströmenden Fluidum bietet, mit der Grösse ihres Winkels, und vielleicht umgekehrt wie diese, wachsen werde. Dies bestätigt sich.

Ich verglich vier Röhren, deren jede eine Länge von 340 Millimeter und einen Durchmesser von 7,03 Millimeter hatte. Die eine Röhre war gerade, die übrigen waren unter Winkeln von respective 150, 120 und 90° gebogen. Diese Röhren waren am Boden eines Wasserbehälters so angebracht, dass der Winkel in eine horizontale Ebene zu liegen kam. Die Fallhöhe H war in allen Fällen $=$ 294 Millimeter; die Geschwindigkeit wurde beobachtet, und erlaubte also, da $H - \frac{v^2}{4g} = w$, den Widerstand zu berechnen. Das Resultat war folgendes:

Winkel der Röhre	Stromschnelle	Widerstandshöhe	Vermehrung der Widerstandshöhe
180°	1395,7	194,4 Mill.	
150°	1318,4	205,2 »	10,8 Mill.
120°	1249,3	214,2 »	9,0 »
90°	1148,8	226,5 »	12,3 »

Es ergiebt sich hieraus, dass mit jeder Verkleinerung des Winkels um 30° die Widerstandshöhe annäherungsweise um 10,7 Millimeter zunimmt. Vergleicht man diese Zunahme des Widerstandes in den winkligen Röhren mit dem in der geraden Röhre statt findenden Widerstande, so beträgt dieselbe:

bei 150° $\frac{1}{17,99}$

» 120° $\frac{1}{9,82}$

» 90° $\frac{1}{6,05}$.

Natürlich kann nicht vorausgesetzt werden, dass das Verhältniss der Widerstandszunahme für einen bestimmten Winkel ein constantes sei etwa in der Weise, dass ein rechter Winkel den Widerstand ein für alle Male um $\frac{1}{6}$ steigere. Der Winkel ist ein Hemmungsmoment, welches den Werth des Widerstandes: $w = av^2 + bv$, nur durch Steigerung der Coëfficienten heben kann, da es den Werth von v sogar herabdrückt. Nun hängt aber die Grösse der Widerstandscoëfficienten von sehr vielen Umständen und nur theilweise vom Winkel ab. Es wird also der Winkel auf die Steigerung des Widerstandes einen um so geringeren Einfluss haben müssen, je geringer sein Antheil an den Coëfficienten, d. h. je mehr Widerstandsursachen noch neben der Röhrenbeugung vorhanden sind.

Um diese an sich unzweifelhafte Betrachtung erfahrungsmässig zu bestätigen, wiederholte ich den vorherbeschriebenen Versuch, mit der einzigen Modification, dass ich durch Verengung der Ausflussmündung meiner Röhren eine Vermehrung der Widerstandsursachen veranlasste. Hiernach ergab sich Folgendes:

Winkel der Röhre	Stromschnelle	Widerstandshöhe	Vermehrung der Widerstandshöhe
180°	622,7	274,2	
150°	611,9	274,9	0,6
120°	601,2	275,5	0,7
90°	592,6	276,1	0,5

Bei jeder Verkleinerung des Winkels um 30° trat diesmal eine mittlere Steigerung der Widerstandshöhe um 0,6 Millimeter

ein, und der rechte Winkel vermehrte den in der geraden Röhre beobachteten Widerstand nur um $\frac{1}{152}$.

Je grösser also verhältnissmässig der Widerstand zur Fallhöhe ist, oder mit anderen Worten, je mehr der unechte Bruch $\frac{H}{w}$ sich der Einheit nähert, um so einflussloser ist ein Winkel auf den Werth des Widerstandes. Im ersten Falle ist $\frac{H}{w} = 1{,}512$, und der rechte Winkel vermehrt den Widerstand um $\frac{1}{6}$, im zweiten Falle ist $\frac{H}{w} = 1{,}072$, und die Zunahme des Widerstandes beträgt nur $\frac{1}{152}$.

§ 32. Der vorstehende Abschnitt ist für die Physik des Kreislaufs ziemlich fruchtbar, er dient dazu, gewisse, von der Physiologie längst anerkannte Lehren wissenschaftlich zu begründen, wie er andrerseits einen Lehrsatz umstösst, welcher sich bisher einer weitverbreiteten Anerkennung rühmte.

Ich beziehe den ersten Theil dieser Bemerkung auf die anerkannte Langsamkeit der Blutbewegung in den vom Herzen entfernteren und durch Gefässspaltung erweiterten Abschnitten der Gefässhöhle, während ich *Poiseuilles* Behauptung, dass der Blutdruck in allen Arterien gleich sei, als den Lehrsatz bezeichne, welcher nach den mitgetheilten Erfahrungen nicht länger haltbar ist. Der folgende Abschnitt wird noch entscheidendere Beweise liefern, dass die Ansicht des französischen Physiologen, mit den Gesetzen der Hydrodynamik in Widerspruch tritt, daher ich die weitere Begründung meiner Einsprüche auf dort verspare.

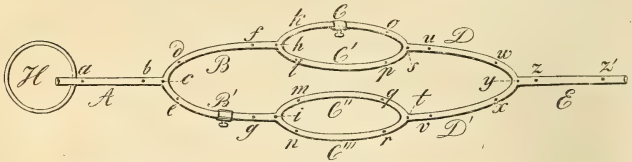
Endlich ergiebt sich auch aus § 30, dass der Abgang eines Gefässes vom Stamme unter einem Winkel von 90° die Blutgeschwindigkeit unmöglich auf eine merkbare Weise herabdrücken könne, da die Summe aller Widerstandsursachen im Gefässsysteme viel zu bedeutend ist, als dass der Einfluss, welchen ein rechter Winkel mehr oder weniger im Systeme der Blutkanäle ausübt, nicht verschwinden sollte.

Cap. III.

Von der Bewegung der Flüssigkeit durch ein System verzweigter Röhren.

§ 33. Die Arterienstämme spalten sich in Aeste, die Aeste wieder in Zweige, und nachdem sich diese Spaltungen mehrfach wiederholt haben, tritt das umgekehrte Verhältniss ein, mehrere Capillargefässe münden in ein Venenästchen, und mehrere Venenäste vereinigen sich zu einem Venenstamme. Beabsichtigt man die Lehre von der Blutbewegung physikalisch zu begründen, so muss man untersuchen, was ein derartiges sich Spalten und nachmaliges Anastomosiren der Röhren für Folgen habe, und welche Gesetze die Bewegung der Flüssigkeiten in so complicirten Röhrensystemen regeln.

Um hierüber zu experimentiren, baute ich aus 10 Zinnröhren, deren jede eine Länge von 500 Millimeter und einen Durchmesser von 7,03 Millimeter hatte, einen Apparat, dessen Einrichtung durch die nachstehende Figur versinnlicht wird.



Unmittelbar am Boden eines Wasserbehälters H (hier nur im Grundriss sichtbar), wurde eine Röhre A in horizontaler Richtung angebracht, welche das ihr zufliessende Wasser an die ebenfalls horizontal liegenden beiden Röhren B und B' abgab. Von letzteren beiden Röhren theilte sich jede wiederum in zwei Arme, nämlich B in $C\ C'$ und B' in $C''\ C'''$. Ein Blick auf die

Figur reicht aus zu zeigen, wie dann $C\ C'$ in D und $C''\ C'''$ in D' anastomosirten, endlich aber D und D' in E zusammen mündeten.

Die Verbindung der Röhren unter einander wurde durch sehr kurze Y förmige Röhrenstückchen vermittelt, deren *lumen* genau so weit war, dass in jedem der drei Arme eine Röhre eingekittet werden konnte.

Der ganze Apparat bestand demnach aus 5 Abschnitten, deren erster nur eine Röhre, A, deren zweiter 2 Röhren, $B\ B'$, deren dritter 4 Röhren, $C\ C'\ C''\ C'''$, deren vierter 2 Röhren, $D\ D'$, und deren fünfter endlich nur eine Röhre enthielt: E. Da alle Röhren die gleiche Weite von 38,81 □Millimeter hatten, so ergiebt sich von selbst, dass sich die Weite des Strombettes im ersten und fünften Abschnitte wie 1, im zweiten und vierten wie 2, im dritten wie 4 verhielt, womit wieder zusammenhängt, dass die Stromschnelle im ersten und fünften Abschnitte doppelt so gross, als im zweiten und vierten, und viermal so gross als im dritten ausfallen musste (§ 24).

Auf jeder Röhre befinden sich zwei, und auf jedem gabelförmigen Verbindungsstücke der Röhren ein Druckmesser an den Punkten, welche mit $a\ b\ c\ \ldots\ z'$ in der Figur bezeichnet sind. Diese Druckmesser waren nach dem Prinzip angeordnet, dass auf jeder Röhre der Eine 100 Millimeter unter dem Anfangspunkte, der Zweite dagegen 100 Millimeter über dem Endpunkte derselben angebracht war. Die Distanz zweier auf denselben Röhren errichteter Druckmesser betrug also überall 300 Millimeter.

Beim Experimentiren wurde der Wasserbehälter H bis zu einer gewissen Höhe mit Wasser gefüllt, und ein schwimmender Heber führte genau so viel Wasser zu, als durch die Ausflussmündung des letzten Abschnitts abfloss. Demnach blieb die Fallhöhe H während der Dauer des Versuches unverändert, und es war möglich, den an verschiedenen Punkten des Systems stattfindenden Seitendruck an den graduirten Manometern abzulesen und aufzuzeichnen. Das Wasser, welches im Zeitraum

von 2 Minuten abfloss, wurde gewogen und zur Bestimmung der Stromschnelle benutzt.

§ 34. In einem bestimmten Versuche ergaben sich für die Punkte *a*, *b*, *c*, *d* u. s. w. folgende, in Millimetern ausgedrückte Druckwerthe:*)

Im Druckmesser

a	235 Millimeter	*o*	145 Millimeter
b	190 »	*p*	145 »
c	185 »	*q*	145 »
d	176 »	*r*	144 »
e	175 »	*s*	143 »
f	158 »	*t*	142 »
g	158 »	*u*	126 »
h	154 »	*v*	126 »
i	153 »	*w*	111 »
k	150 »	*x*	111 »
l	150 »	*y*	110 »
m	150 »	*z*	58 »
n	150 »	*z'*	14,5 »

Die Resultate des Versuches sind folgende:

1) Der Seitendruck nimmt von der Einflussmündung gegen die Ausflussmündung stetig ab, ausgenommen an den Uebergangspunkten verschiedener Röhrenabschnitte, wo die Stauungsverhältnisse sich geltend machen (§§ 27 und 28).

2) Punkte, welche gleichweit von der Einflussmündung entfernt liegen (also Punkte, welche verschiedenen Röhren, aber gleichen Sectionen angehören), ergeben gleiche Druckwerthe.

3) Der Seitendruck nimmt von der Einflussmündung gegen die Ausflussmündung nicht gleichmässig, sondern ungleichmässig

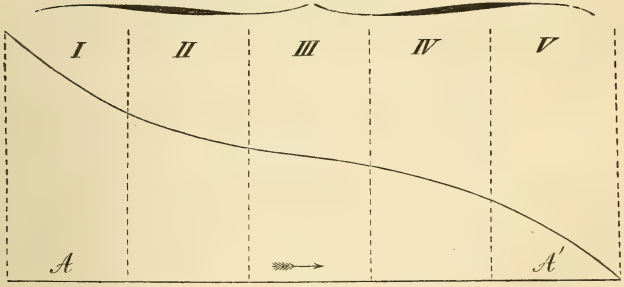
*) Zur bequemeren Uebersicht sind diejenigen Druckmesser durch Klammern zusammengezogen, welche sich unter gleichen Entfernungen von der Einflussmündung des Apparates befinden.

ab, und zwar in jedem Abschnitte um so rascher, je geringer dessen Weite ist, und in Abschnitten von gleicher Weite annäherungsweise in gleichem Masse.

4) Diejenigen Punkte, welche genau in der Mitte des Röhrensystems, also in der Mitte der vier Röhren $C\ C'\ C''\ C'''$ liegen, zeigten einen Seitendruck, welcher den mittleren Werth desselben ziemlich merklich überstieg. *)

Die Abwandlung des Seitendrucks in dem erwähnten Apparate lässt sich graphisch durch eine Curve darstellen, die man erhält, wenn man die horizontale Axe des Röhrensystems als Abscissenlinie $A\ A'$ benutzt und die an bestimmten Punkten gemessenen Druckhöhen als Ordinaten aufträgt.

Die beobachtete Curve nahm sich ungefähr wie folgende aus.



Wir erhalten also im Wesentlichen dieselbe Curve wieder, welche wir für eine einfache im Mittelstücke erweiterte Röhre erhielten (§ 28), und dürfen daher im Voraus erwarten, dass sie sich durch das gesetzliche Verhältniss des Drucks zur Geschwindigkeit nach der Formel:

$$w = av^2 + bv$$

erklären lassen werde.

*) Wahrscheinlich in Folge der Stauung des Wassers an allen den Stellen, wo sich der Strom zweier Röhren in eine zusammen zwängt.

Ich habe oben gezeigt, dass die Differenz des Seitendrucks zwischen zwei Punkten einer Röhre dem Widerstande proportional ist, welcher sich in dem von ihnen begrenzten Segmente entwickelt (§ 29). Wir haben also für jede Röhre des Apparats eine Strecke von 300 Millimeter Länge, für welche der Widerstand durch die Seitendruckdifferenz gegeben ist.*) Es beträgt w im Mittel aller Beobachtungen im ersten Abschnitte des Apparats 45 Millimeter, im zweiten 17,5 Millimeter, im dritten 5,25, im vierten 15, im fünften 43,5 Millimeter. Ebenso ist die Stromschnelle für jede Röhre bekannt. Da nämlich in 2 Minuten 3,35 Liter Wasser abliefen, und die Weite der Röhren 38,81 □Millimeter betrug, so berechnet sich v in der Ausflussröhre E und folglich auch in A auf 719,3 Millimeter. Da nun der zweite und vierte Abschnitt die doppelte Weite des ersten und fünften hatte, so musste in ihnen die Stromschnelle 359,65 Millimeter, im dritten Abschnitt aber, als dem vierfach weiteren, 179,82 Millimeter betragen.

Auf diese Weise sind die zusammengehörigen Werthe von w und v für 5 Fälle gegeben, und man kann aus ihnen die Widerstandscoëfficienten berechnen. Ich fand $a = 0{,}000050056$ und $b = 0{,}025667$. Ich habe mit Hülfe dieser Coëfficienten aus den beobachteten Widerständen die Geschwindigkeit, und aus den beobachteten Geschwindigkeiten die Widerstände berechnet, und habe die Resultate der Beobachtung und Rechnung im Folgenden tabellarisch zusammengestellt.

---

*) Ich erlaube mir, um Längen in der Darstellung zu vermeiden, hier den Unterschied zwischen w und $S = s$ zu ignoriren, was dem Zusammenhange nach zulässig ist.

Tabelle

über das gesetzliche Verhältniss der Werthe w und v in einem verzweigten Röhrensystem.

Röhrenabschnitt	Widerstand		Stromschnelle	
	beobachtet	berechnet	beobachtet	berechnet
I	45 Mill.	44,35 Mill.	719,3 Mill.	725,8 Mill.
II	17,5 »	15,7 »	359,65 »	388 »
III	5,25 »	6,23 »	179,82 »	156,6 »
IV	15,0 »	15,7 »	359,65 »	348 »
V	43,5 »	44,35 »	719,3 »	710,4 »

Die berechneten Werthe stimmen also ziemlich genau zu den beobachteten, und die Unterschiede zwischen beiden fallen durchweg in die Beobachtungsfehler. Denn da bei Bestimmung des Seitendrucks Irrthümer von 1 Millimeter nicht füglich vermieden werden konnten, so betrug der mögliche Fehler bei Bestimmung der Seitendruckdifferenz, w, nicht weniger als 2 Millimeter, und der grösste Unterschied zwischen dem gefundenen und berechneten w beträgt nur 1,8 Millimeter.

Nach allem Vorausgeschickten kann also kein Zweifel sein, dass auch in einem nach Art der Blutgefässe verzweigten Röhrensysteme die Stromschnelle und der Widerstand dem hydrodynamischen Gesetze folgen, welches in der Formel $w = av^2 + bv$ seinen Ausdruck findet.

§ 35. Benutzt man die § 33 gegebenen Widerstandshöhen zur Aufzeichnung der Seitendruckcurve, so wird man sich sogleich überzeugen, dass Stauungsverhältnisse dieselbe wesentlich bedingen. So finden sich z. B. für die in gleichen Entfernungen auf einander folgenden Punkte: w, y, z die Druckwerthe 111, 110, 58!

Es ist nicht ohne Interesse zu untersuchen, in welcher Weise die Seitendruckcurve durch Stauung verändert werde, und es mag deshalb die beobachtete Curve mit einer idealen verglichen

werden, in welcher der Einfluss der Stauung eliminirt ist. Man gelangt aber zu dieser Elimination nach folgenden Grundsätzen:

Mit Hülfe der Formel $w = av^2 + bv$ haben wir ermittelt, wie viel Widerstand in jedem der 5 Abschnitte unseres Apparats auf eine Strecke von 300 Millimeter entwickelt wird. Da alle Abschnitte gleich lang sind, so sind die für 300 Millimeter lange Strecken gefundenen Werthe zugleich Proportionalzahlen für die Widerstände der ganzen Abschnitte. Kennt man nun die Totalität des Seitendrucks, d. h. den Seitendruck an der Einflussmündung des Apparats, so vertheilt man die Summe desselben nach Massgabe der gefundenen Proportionalzahlen auf die einzelnen Abschnitte und erhält hiermit die von der Stauung unabhängige Seitendruckdifferenz jedes ganzen Abschnitts und somit auch die geforderte Curve. Es waren nach der im vorigen § gegebenen Tabelle die Proportionalzahlen des Seitendrucks

für Abschnitt $I = 44{,}35$
» » $II = 15{,}7$
» » $III = 6{,}23$
» » $IV = 15{,}7$
» » $V = 44{,}35$

Summa 126,33 Masstheile Seitendruck

für den ganzen Apparat. Nun war der Seitendruck an der Einflussöffnung = 250 Millimeter gefunden, und folglich ist $\frac{250 \text{ Mill.}}{126{,}33} = 1{,}979$ Millimeter der Werth eines solchen Masstheiles, wie deren der ganze Apparate 126,33 vorkommen.

Nun vertheilen sich die 250 Millimeter Seitendruck des ganzen Apparates auf folgende Weise unter die 5 Abschnitte:

Abschnitt I $44{,}35 \times 1{,}979 = 87{,}76$ Mill.
» II $15{,}7 \times 1{,}979 = 31{,}07$ »
» III $6{,}23 \times 1{,}979 = 12{,}33$ »
» IV $15{,}7 \times 1{,}979 = 31{,}07$ »
» V $2{,}435 \times 1{,}979 = 87{,}76$ »

Summa 249,99 Mill.

Da nun die Länge jedes Abschnitt = 500 Millimeter bekannt ist, und alle Röhren von gleichmässigem Kaliber sind, so lässt sich genau berechnen, wie viel Seitendruck ein bestimmtes Segment jeder Röhre entwickele. Beträgt beispielsweise die ganze Seitendruckdifferenz des ersten Abschnitts von 500 Millimeter Länge 87,76 Millimeter, so ergiebt sich für 100 Millimeter Röhrenlänge desselben Abschnitts eine Differenz von 17,55. Ist nun an der Einflussmündung des Apparats der Seitendruck = 250, so muss er in *a* sein 250 — 17,55, in *b* 250 — 4. 17,55 u. s. w. In der folgenden Tabelle sind nun die beobachteten und berechneten Seitendruckwerthe neben einander gestellt, auch ist in der dritten Columne die Differenz beider angemerkt.

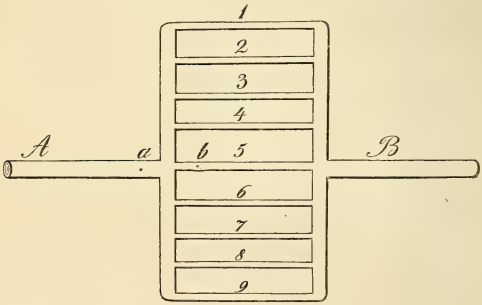
	Druckwerthe		
Druckmesser	beobachtet	berechnet	Differenz
a	235	232,45	+ 2,55
b	190	179,8	+ 10,2
c	185	162,25	+ 22,75
d	176	156,04	+ 19,96
f	158	137,39	+ 20,61
h	154	131,18	+ 22,82
k	150	128,71	+ 21,29
o	145	121,32	+ 23,68
s	143	118,85	+ 24,15
u	126	112,64	+ 13,36
w	111	93,99	+ 17,01
y	110	87,78	+ 22,22
z	58	70,23	— 12,23
z'	14,5	17,58	— 3,08

Da die in der dritten Columne verzeichneten Differenzen nichts Anderes als die durch Stauung veranlassten Störungen der Druckwerthe bezeichnen, so sieht man, dass in einem nach Art der Blutgefässe verzweigten Röhrensysteme der Seitendruck in allen Abtheilungen, mit einziger Ausnahme der Ausflussröhre,

eine Steigerung erfährt. Dieses Resultat durfte im Voraus erwartet werden. Die Hemmung, welche das Wasser in der letzten Anastomose (im Apparate bei y) erfährt, hemmt natürlich jedes Molekül Wasser, welches zwischen ihr und der Einflussmündung befindlich ist, und da jede Hemmung des Fliessens den Seitendruck steigert, so ist eine Steigerung des Seitendrucks durch den ganzen Apparat aufwärts unvermeidlich.

§ 36. Ich werde hier die Betrachtung eines anderen Falles einschieben, welcher dem Gesetze, dass der Seitendruck abwärts von der Einflussmündung eines Röhrensystems abnehme, zu widersprechen scheint.

Ich liess Wasser durch ein verzweigtes Röhrensystem fliessen, dessen Einrichtung durch die beistehende Figur erläutert wird.



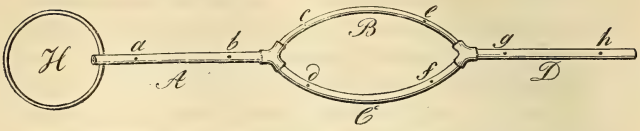
Eine weite Röhre A, durch welche das Wasser in den Apparat einfliesst, und eine ebenso weite Röhre B, durch welche das Wasser abfliesst, stehen durch ein System von 9 engen Collateralröhren 1, 2 — 9 in offner Verbindung. Von den engen Röhren hat eine, Nr. 5, eine derartige Lage, dass ihre Axe mit denen der beiden dicken Röhren eine gerade Linie bildet. An den beiden Punkten a und b sind Druckmesser angebracht, von welchen der bei a befindliche der Einflussmündung näher steht, und folglich den grössern Druck erwarten lässt. In Widerspruch

hiermit erhob sich das Wasser in *a* nur auf 31‴, dagegen in *b*, wo es nach Verhältniss der grössern Entfernung von der Einflussmündung ein Paar Linien tiefer hätte stehen müssen, stieg das Wasser auf die Höhe von 65‴.

Ich zweifle nicht, dass auch diese Unregelmässigkeit sich auf die Verhältnisse der Stauung beziehe. Die Strömung wird in der Röhre *A* überaus rasch sein müssen, da die 9 Collateralröhren ebenso viele Abzugskanäle darstellen, welche zusammengenommen sehr viel Wasser consumiren. Nun schiesst der Wasserstrom aus der Einflussröhre *A* in die gegenüberliegende Nr. 5, welche viel zu eng ist, um eine gleiche Geschwindigkeit zu gestatten. Das Wasser erfährt also eine Stauung und erhebt sich in der Röhre *b* nach demselben Prinzipe, welches veranlasst, dass das Wasser eines reissenden Stromes sich bei einem Brückenpfeiler über das Niveau erhebt. Die 35‴, um welche das Wasser im Druckmesser *b* zu hoch steht, sind als Geschwindigkeitshöhe zu fassen und erklären unstreitig die Differenz der grossen Stromschnelle in *A* und der sehr geringen in der Röhre Nr. 5. Leider fiel mir diese Erklärung des Vorfalls erst später ein, wo ich nicht mehr im Besitze des Apparates war, und also die Richtigkeit dieser jedenfalls wahrscheinlichen Auffassungsweise durch Versuche nicht constatiren konnte.

§ 37. Im Vorhergehenden war von einem verzweigten Röhrensystem die Rede, dessen Arme sämmtlich von gleicher Länge und gleichem Durchmesser waren. Um nun den Verhältnissen immer näher zu kommen, welche im Gefässsysteme eines Thieres obwalten, ist zu untersuchen, welchen Einfluss eine Ungleichheit der Collateralröhren, also verschiedene Länge und Weite der sich verzweigenden Röhren auf die Erscheinungen ausübe?

Um diese Frage zu lösen, construirte ich aus vier Zinnröhren, *A B C D*, einen Apparat, wie ihn die nachstehende Figur versinnlicht.



Alle Röhren hatten eine Länge von 500 Millimeter und eine Weite von 38,81 □ Millimeter, mit einziger Ausnahme der Röhre *B*, welche zwar ebenso lang, als die übrigen, aber nur 9,612 □ Millimeter weit war. Die Zusammenfügung der Röhren war dieselbe wie in dem grossen Apparate, auch waren auf jeder Röhre zwei Druckmesser *ab, ce, df, gh,* ganz nach denselben Prinzipien wie früher beschrieben, angebracht (vergl. § 33). Hieraus ergiebt sich, dass die Druckmesser *cd* einerseits und *ef* andrerseits gleichweit von der Einflussmündung des Apparates entfernt liegen, *c* und *d* 600 Millimeter, dagegen *e* und *f* 900 Millimeter.

Die Resultate dreier Beobachtungen sind übersichtlich in Folgendem zusammengestellt.

Beobachtung	Höhe des Wasserstandes in den Druckmessern.							Wasserabflüsse in 1 Secunde	v in Röhre *A*.
	a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*		
1.	240	197	164	152	125	120	57	26,666 Gr.	687
2.	306	247	205	189	154	146	47 (?)	31,308 »	806,7
3.	432	355	293	272	227	220	102	38,523 »	962,6.

Demnach betrug die Seitendruckdifferenz auf ein Röhrensegment von 300 Millimeter Länge in Röhre:

		A.	*B.*	*C.*
Beobachtung	1.	43	39	32
—	2.	59	51	43
—	3.	77	66	52.

Man bemerke, dass dies Mal die Punkte, welche in gleicher Entfernung von der Einflussmündung liegen, z. B. *c* und *d*, nicht

gleiche Druckhöhe zeigen, und dass die Seitendruckdifferenz in Röhren desselben Abschnitts (in B und C) verschieden ausfällt. Ueberhaupt machen die Werthe des Seitendrucks den Eindruck vollkommen zufälliger und gesetzloser Verhältnisse, wie besonders deutlich wird, wenn man den Apparat sich aufzeichnet und an den Punkten, wo die Druckmesser befindlich sind, die betreffenden Zahlen anmerkt. Gleichwohl geschieht auch im vorliegenden Falle nichts, als was in Folge der mehrfach erwähnten hydrodynamischen Gesetze nothwendig geschehen musste.

Benutzt man die in der Röhre A gleichzeitig beobachteten Werthe von w und v, nämlich:

1. Beobachtung	$w = 43,$	$v = 687$
2. — —	$w = 59,$	$v = 806,7$
3. — —	$w = 77,$	$v = 962,6$

zur Aufsuchung der Widerstandscoëfficienten in der Formel $w = av^2 + bv$ (*Gl. I*), so erhält man:

$$a = 0,000059501; \quad lg. = 0,77452—5.$$
$$b = 0,023225; \quad lg. = 0,36595—2.$$

Nun ist $w = \frac{m}{d} v^2 + \frac{n}{d\sqrt{d}} v$ (§ 29)

daher, mit Rücksicht auf Gleichung I, $m = ad$ und $n = bd\sqrt{d}$.

Führt man die Rechnung aus, so ergiebt sich:

$$m = 0,00041829; \quad lg. = 0,62148—4.$$
$$n = 0,432902; \quad lg. = 0,63639—1.$$

Mit Hülfe dieser Coëfficienten kann man aber die Geschwindigkeit in jeder Röhre berechnen. Denn da

$$w = \frac{m}{d} v^2 + \frac{n}{d\sqrt{d}} v$$

so ist $v^2 + \frac{n}{m\sqrt{d}} v = \frac{dw}{m}$

$$\text{also } v = -\frac{n}{2m\sqrt{d}} + \sqrt{\frac{\left(\frac{n}{m\sqrt{d}}\right)^2}{4} + \frac{dw}{m}}$$

Berechnet man nach dieser Formel die im ersten Versuche stattfindende Stromschnelle, so erhält man:

für Röhre *B*, $v = 358{,}1$ Millimeter
— — *C*, $v = 563{,}6$ »

Es fragt sich jetzt, ob dieses Resultat der Rechnung annehmbar sei? Dass dies wirklich der Fall ist, ergiebt sich aus Folgendem: Da die Röhre *A* in einer Secunde 26,66 Grammes Wasser entleerte, so müssen die Röhren *B* und *C* gemeinschaftlich ebensoviel entleeren.

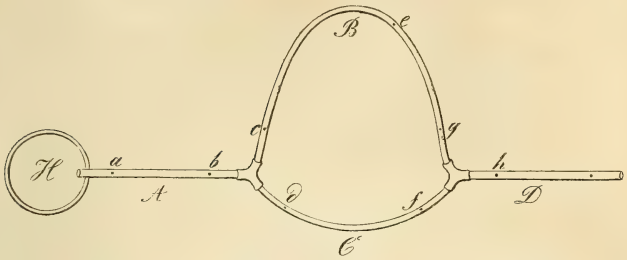
Nun hat *B* eine Durchschnittsfläche von 9,61 □ Millimeter, entleert also in einer Secunde $358{,}1 \times 9{,}61 = 3442$ Kubikmillimeter, oder 3,442 Grammes.

Ferner hat *C* eine Durchschnittsfläche von 38,81 Millimeter, entleert also in jeder Secunde $563{,}6 \times 38{,}81 = 21873$ Kubikmillimeter, oder 21,873 Grammes.

Es liefert *B* = 3,442 Grammes,
» *C* = 21,873 »
Summa 25,315 Grammes, für 26,66 Grammes.

Eine Uebereinstimmung, welche vollkommen ausreicht zu beweisen, dass die Gesetzlichkeit des scheinbar verworrenen Vorganges richtig gewürdigt wurde. Ein brauchbares Resultat des Versuches ist beiläufig dies, dass von zwei Collateralkanälen, die gleich lang, aber von ungleicher Weite sind, der weitere zwar mehr, aber nicht nach Proportion seiner Weite mehr Flüssigkeit abführt.

§ 38. Um auch den Einfluss zu prüfen, welchen verschiedene Länge der Collateralarme auf das Verhältniss des Drucks zur Geschwindigkeit ausübt, baute ich einen Apparat, welcher in nachstehender Figur versinnlicht ist.



In diesem Apparate haben alle Röhren die gleiche Weite von 38,81 □ Millimeter, dagegen hat *B* die doppelte Länge der übrigen, nämlich 1000 Millimeter statt 500. Die Druckmesser *a*, *b*, *c* u. s. w. sind nach dem schon mehrmals erwähnten Princip angebracht (§ 33), nur ist für *B* zu bemerken, dass die Distanz zwischen *c* und *e* 500 Millimeter, die zwischen *e* und *g* 300 Millimeter beträgt. Als Wassser durch den Apparat strömte, zeigte sich Folgendes:

Beobachtung	Druckhöhen in den Röhrenpunkten.								Wasserabfluss in 1 Sec.	*v* für Röhre *A*
	a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*		
1.	340	267	236	212	202	184	182	95	37,208 Gr.	958,7 Mm.
2.	231	182,5	167	151	145	131	131,7	59,3	28,250 »	729,6 »

Abermals zeigt sich in den Verhältnissen des Seitendrucks eine scheinbare Regellosigkeit; denn erstens sind die Druckwerthe an gleichartig gelegenen Punkten wie *c* und *d* nicht übereinstimmend; zweitens ist der Widerstand, d. h. die Seitendruckdifferenz in vollkommen gleichen Röhrensegmenten wie *df* und *eg* nicht identisch, und drittens ergiebt der Punkt *e*, obschon er 200 Millimeter weiter abwärts liegt wie *f*, einen höheren Seitendruck als dieser. Aber durch alle diese scheinbaren Unordnungen zieht sich der ordnende Einfluss des Gesetzes.

Wenn in der ersten Beobachtung zwischen den Druckmessern c und g auf eine Strecke von 800 Millimeter eine Seitendruckdifferenz von 54 Millimeter statt findet, so beträgt die Differenz für eine 300 Millimeter lange Strecke 20,25.

Es betragen demnach die Seitendruckdifferenzen auf 300 Millimeter lange Röhrensegmente in

	A	B	C
1. Beobachtung	73	20,25	28
2. »	48,5	13,23	20

also $\frac{73}{958,7} = a\ 958,7 + b$ (§ 10, Anmerkung)

und $\frac{48,5}{729,6} = a\ 729,6 + b$

wonach $a = 0,00004519$

und $b = 0,032822$

Es bedarf kaum der Bemerkung, dass diese Coëfficienten zu 300 Millimeter langen Abschnitten des vorstehenden Apparates gehören. Berechnet man nun nach der Formel

$$v = -\frac{b}{2a} + \sqrt{\frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2}{4} + \frac{w}{a}}$$

die Stromschnelle, so erhält man in der ersten Beobachtung für B 424,1 Millimeter, für C dagegen 503,7 Millimeter, ein Resultat, welches bereits in so weit der Erwartung entspricht, als die längere Röhre mehr Hemmnisse und in Folge dieser eine auffallendere Verlangsamung des Stromes veranlassen musste. Verfolgen wir aber die Rechnung weiter, so entleert in 1 Secunde:

Röhre B:

424,1 × 38,81 □Mm. = 16460 Mm. Cub. = 16,460 Gr. Wasser

Röhre C:

503,7 × 38,81 □Mm. = 19548 Mm. Cub. = 19,548 » »

Summa = 36,008 Gr. W.-Abfl.

Ein Ergebniss, welches sehr leidlich zu der Beobachtung passt,

dass durch Röhre A in einer Secunde 37,208 Grammes Wasser zugeführt wurden.

Etwas weniger genau passt die Rechnung auf den zweiten Versuch, aber immerhin genau genug, um die Richtigkeit des Prinzips zu bestätigen. Man erhält für B eine Geschwindigkeit von 288,42 Millimeter, für C dagegen $v = 394{,}73$ Millimeter. Hiernach wird an Wasser abgeführt:

durch Röhre B:

$288{,}42 \times 38{,}81 \square$Mill. $= 11194$ Cub. Mill. $= 11{,}194$ Grammes

durch Röhre C:

$394{,}73 \times 38{,}81 \square$Mill. $= 15320$ Cub. Mill. $= 15{,}320$ »

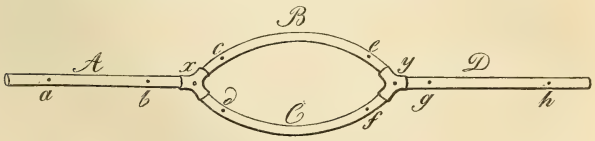
Summa 26,51 Gr.

statt 28,2 Grammes, welche im zweiten Versuche aus Röhre A zuflossen.

Beiläufig lehrt der Versuch, dass *caeteris paribus* im kürzeren Collateralarme die grössere Stromschnelle statt finde, aber nicht etwa in dem um das Doppelte kürzeren eine doppelt grössere.

§ 39. Es sei hier eine kleine Abschweifung gestattet, welche zur Beseitigung möglicher Missverständnisse nöthig scheint. Die in den beiden vorhergehenden §§ beleuchteten Fälle können nämlich zu Schlüssen Veranlassung geben, welche mit der Erfahrung in Widerspruch scheinen; es ist für die Folge erheblich, denselben zu beseitigen.

Wenn eine Röhre A sich in zwei Arme B C spaltet, welche sich wieder in einer Abflussröhre D vereinigen, so findet bei x



ein Druck statt, welcher anscheinend mit gleichem Rechte auf den Anfang der Röhre B, als auf den Anfang der Röhre C bezogen werden kann, und ebenso wird der bei y stattfindende

Druck ein Werth sein, welcher auf das Ende beider Collateralröhren in gleichem Masse bezüglich ist. Wenn nun in beiden Röhren, d. h. in *B* und in *C*, sowohl an den Anfangspunkten, als an den Endpunkten ein übereinstimmender Druck stattfindet, so ist auch die Seitendruckdifferenz zwischen Anfangs- und Endpunkt in beiden Röhren dieselbe. Hieraus würde dann folgen, dass in allen Fällen, wo die Collateralröhren gleiche Länge haben, gleich lange Segmente derselben ebenfalls gleiche Seitendruckdifferenzen ergeben müssten.

Dieser Schluss steht nun mit den in § 36 niedergelegten Erfahrungen in Widerspruch, denn obschon die Collateralröhren *C* und *B* die gleiche Länge von 500 Millimeter hatten, so war doch die Seitendruckdifferenz auf eine 300 Millimeter lange Strecke in der engeren Röhre *B* stets grösser, als in der weiten Röhre *C*.

Irre ich nicht, so löst sich die Schwierigkeit in folgender Weise:

Zunächst ist richtig, dass der bei y stattfindende Druck der Werth des Seitendrucks oder der Widerstandshöhe in beiden Röhren ist. In der That hat das Wasser, mag es aus *B* oder *C* ausströmen, genau denselben Widerstand vor sich, den nämlich, welchen die Röhre *D* bietet. Gesetzt, die Röhre *D* wäre unendlich kurz, so wäre der Widerstand, den sie veranlasst, gleich 0, und hier liegt am Tage, dass der Druck am Ende beider Collateralröhren gleich, nämlich ebenfalls $= 0$ sein müsse.

Es fragt sich nun weiter, ob auch der Druck am Anfange der Röhren *B* und *C* gleich sei? Dies ist offenbar unmöglich, wenn der Durchmesser derselben verschieden ist. Die engere Röhre wird mehr Widerstände erzeugen als die weite, sie verlangt also bei gleicher Fallhöhe eine grössere Widerstandshöhe, und folglich auch stärkeren Seitendruck an ihrem Anfangspunkte.

Es fragt sich also, wo dieser grössere Druck herzunehmen sei. Ein solcher würde sich allerdings nicht finden, wenn die bei x vorkommende Widerstandshöhe wirklich den Druck im Anfange beider Röhren bezeichnete. Diese Widerstandshöhe be-

zeichnet aber nur den Druck an dem Berührungspunkte der 3 Röhren *A*, *B*, *C*. Rechnen wir zu derselben die Geschwindigkeitshöhe, welche die Stromschnelle in *A* vermittelt, so erhalten wir die Fallhöhe *H*, welche gemeinschaftlich auf beide Collateralröhren wirkt. Von diesem Werthe *H* wird nun in der engen Röhre mehr zur Besiegung der Widerstände verwendet werden müssen, als in der weiten, folglich wird auch die Widerstandshöhe in derselben grösser und die Seitendruckdifferenz zwischen Anfang und Endpunkt beträchtlicher sein müssen.

Sind die beiden Collateralröhren von gleicher Weite, aber ungleicher Länge, so muss in der längeren mehr Widerstand erzeugt werden, wie in der kürzeren, woraus von selbst folgt, dass dann auch die Seitendruckdifferenz zwischen Anfangs- und Endpunkt in der langen Röhre grösser als in der kurzen ausfällt. Dagegen folgt hieraus natürlich nicht, dass der Werth der Seitendruckdifferenz in gleich langen Segmenten beider Collateralröhren wieder zu Gunsten der längeren ausfalle, im Gegentheil; je mehr das Mass der langen Röhre das der kurzen überwiegt, um so mehr ist zu erwarten, dass die Seitendruckdifferenz gleich langer Abschnitte in der längeren Röhre geringer ausfalle, als in der kürzeren.

Ich muss zugeben, dass auch nach dieser Darstellung etwas Schwieriges übrig bleibt, was ich vor der Hand nicht aufzulösen vermag.

Ich habe erwiesen, dass an dem Punkte, wo 2 Collateralröhren anastomisiren, also an den Enden beider, ein gleicher Druck erwartet werden müsse, dass dagegen an dem Punkte, wo sie sich spalten, oder genauer im Anfang jeder Röhre, ein Druck von verschiedenem Werthe zu erwarten sei. Letzteres ist nun von der Seite, welche ich hervorgehoben habe, unleugbar, von einer anderen Seite dagegen unverständlich. Sind nämlich die Seitendruckwerthe im Anfange der Collateralröhren unter sich verschieden, so muss mindestens der eine dieser Werthe sich auch von dem bei *x* stattfindenden Drucke unterscheiden. Nun

liegt aber, wie schon bemerkt, der Punkt x an der Grenze der 3 Röhren A, B und C, wonach nicht Verschiedenheit, sondern Identität der Druckwerthe erwartet werden sollte.

Vielleicht steht diese Verschiedenheit des Druckes an zwei in unmittelbarer Nachbarschaft gelegenen Punkten in Zusammenhang mit den Verhältnissen, welche in der Gleichung

$$w = S + \varsigma$$

zur Sprache kommen. Die Widerstandshöhe in einem Gefässe, aus welchem Wasser ausfliesst, fand sich befremdlicher Weise auch grösser als der Seitendruck im Anfange der Röhre, welche zum Abflusse diente.

§ 40. Ich habe im Vorhergehenden bewiesen, dass die Abwandlungen, welche der Seitendruck in einem verzweigten Röhrensysteme erfährt, einem bestimmten Gesetze unterliegen. Das Gesetz hat seinen Grund in der Abhängigkeit des Druckes von der Stromschnelle und gilt nicht nur für derartige regelmässig und symmetrisch zusammengesetzte Systeme, welche dem strömenden Fluidum in verschiedenen Flussbahnen ganz gleiche Hemmnisse entgegenstellen, sondern auch für solche unregelmässige, wo ein fliessendes Molekül in verschiedenen Bahnen Hemmnisse von ungleicher Grösse zu überwinden hat.

Ich trage kein Bedenken zu erklären, dass ich die hydrodynamischen Gesetze auch für die Vorgänge im Kreislaufe als bindend betrachte. Das Blut wird in Folge von Adhäsion an den Gefässwanden haften, es wird, indem es durch die Adern strömt, wenn nicht an Rauhigkeiten der Wandungen, doch an den Gefässwinkeln anstossen, und die Widerstandseffecte, welche hierbei zum Vorschein kommen, werden zu der Geschwindigkeit in dem Verhältnisse stehen, welches durch das hydrodynamische Gesetz beansprucht wird. Ich bemerke, dass diese Behauptung auch für die Physiologen Gültigkeit haben dürfte, welche im lebendigen Körper spezifische Kräfte annehmen; denn mag auch das Blut durch eine Lebenskraft bewegt werden, immerhin bewegt es sich als Masse, stösst als Masse auf mechanischen Wi-

derstand und unterliegt, in so weit es auf diesen stösst, den mechanischen Gesetzen. Aus diesem Grunde sind wir berechtigt, über gewisse Verhältnisse des Blutdruckes abzuurtheilen, selbst ohne die bestätigende Erfahrung abzuwarten, nur müssen, wie sich von selbst versteht, die Bedingungen gegeben sein, auf welche das Gesetz in Anwendung kommen soll. Leider wissen wir von diesen Bedingungen noch zu wenig, um jetzt schon aus der Theorie erhebliche Vortheile ziehen zu können, indessen lassen sich doch hin und wieder Andeutungen geben, welche die unermessliche Menge der möglichen Vorkommnisse beschränken und uns der Wirklichkeit näher führen. Meines Erachtens lassen sich jetzt schon folgende Behauptungen aufstellen:

1) Der Blutdruck nimmt vom Anfange des arteriellen Systems bis zum Ende des venösen im Allgemeinen ab, und Ausnahmen von diesem Gesetze können nur an den Punkten vorkommen, wo die Stauungsverhältnisse sich geltend machen.

2) Gefässpunkte, welche in gleicher Entfernung vom Anfange des Systems, also im grossen Kreislaufe von der Aortenmündung liegen, werden nicht selten einem verschiedenen Druck ausgesetzt sein, und zwar diejenigen, welche in den für das Blut schwierig zu passirenden Bahnen liegen, einem grösseren.

3) Das Haargefässnetz, inwiefern es zwischen Arterien und Venen in der Mitte des verzweigten Gefässsystems liegt, ist einem Drucke ausgesetzt, welcher mehr als die Hälfte des unmittelbar am Herzen vorkommenden Maximums beträgt.

Nach Analogie der Vorgänge in unserem verzweigten Röhrenapparate (§ 33 u. ff.) könnte man geneigt sein anzunehmen, dass in den Abschnitten der Gefässhöhle, in welchen das Blut am schnellsten fliesst, also in den weitesten Gefässstämmen, die Abnahme des Seitendrucks am raschesten erfolgen, d. h. die Seitendruckdifferenz zwischen zwei distanten Punkten am grössten ausfallen müsse; dieser Schluss hält jedoch bei näheren Betrachtungen nicht Stich. Die Seitendruckdifferenz, welche, wie

bemerkt, dem Widerstande zwischen den betreffenden Punkten entspricht, richtet sich nach der Formel:

$$w = \frac{m}{d} v^2 + \frac{n}{d^{\frac{3}{2}}} v$$

und ist also unter anderen auch eine Function von d. In unserm grossen Apparate (§ 33) haben alle Röhren gleichen Durchmesser, womit d in Wegfall kommt, und jede Verminderung von v nothwendig auch w, oder, was dasselbe ist, die Seitendruckdifferenz herabdrückt. Ist dagegen d eine veränderliche Grösse, so stellt der Fall sich anders. Denn da in beiden Gliedern, welche die Summe des Widerstandes geben, v im Zähler und d im Nenner steht, so haben beide Werthe entgegengesetzte Wirkung, und wie Verminderung der Stromschnelle den Widerstand schwächt, muss Verminderung des Durchmessers ihn steigern.*) Ob in weiten oder engen Gefässen der Blutdruck rascher abnehme, lässt sich durchaus nicht sagen, so lange die Werthe der Coëfficienten m und n uns unbekannt sind.

§ 41. Im Vorhergehenden erläuterte ich an einem verzweigten Röhrenapparate die Abwandlung des Seitendrucks und der Geschwindigkeit, welche zwischen der Einfluss- und Ausflussmündung eines derartigen Systems statt findet; ich gehe nun zur Beleuchtung des Einflusses über, welchen die Verzweigung der Röhren auf Widerstand und Stromschnelle im Ganzen hat. Die Frage, welche in Untersuchung kommen soll, ist die: entsteht mit der Verzweigung und der gleichzeitigen Vervielfältigung der Abzugskanäle eine Vermehrung des Widerstandes, welche der Vergrösserung der Adhäsionsfläche und der Vermehrung der Winkel in den Anastomosen proportional ist?

Einige Physiologen sind offenbar von der Voraussetzung ausgegangen, dass eine derartige Proportion stattfinde, denn sie

*) Zur Erläuterung des Gesagten dient schon das § 37 beschriebene Experiment. Trotz der um das Doppelte verminderten Stromschnelle im engen Röhrenarme B ergab sich die Seitendruckdifferenz doch fast eben so gross, als in dem weiten Segmente A.

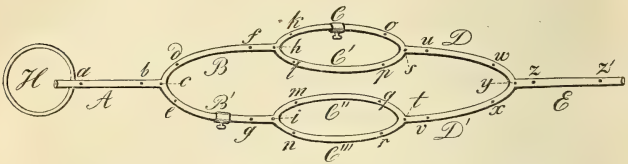
suchen aus der Enormität des Widerstandes, welche die zahllosen Haargefässe dem Blutstrome entgegenstellen müssten, zu beweisen, dass die Herzkraft allein zur Gewältigung solcher Widerstände nicht ausreiche. Bereits Bergmann hat darauf aufmerksam gemacht, dass die Menge der Capillaren den Widerstand nicht vermehren, sondern nur vermindern könne.*) Er beruft sich erläuterungsweise auf ein Gefäss, dessen Boden mit zahlreichen kleinen Oeffnungen durchlöchert ist, und in welches von oben her ein gleichmässiger Zufluss von Wasser statt findet. Es ist klar, dass die Bedingungen dann so angeordnet werden können, dass das Wasser, anfänglich wenigstens, in geringerer Menge ab- als zufliesst. Dann wird es in dem Gefässe so lange steigen, bis es eine Druckhöhe erreicht hat, bei welcher der Abfluss dem Zuflusse gleich ist. Offenbar wird die Druckhöhe, bei welcher diese Ausgleichung eintritt, um so später erreicht werden, je weniger Abflussöffnungen am Boden des Gefässes angebracht sind, woraus sich unmittelbar ergiebt, dass die Hemmnisse, welche das Fliessen behindern, und die Zahl der Abzugsöffnungen sich in einem umgekehrten Verhältnisse befinden.

Der von Bergmann vorgetragene Fall gestattet in so weit eine Anwendung auf die Verhältnisse des Kreislaufes, als durch Vermehrung der Capillaren, welche die Abzugsgefässe für das zuströmende Arterienblut sind, der Abfluss begünstigt und folglich der an die Herzkraft zu machende Anspruch ermässigt wird. Dagegen gehen die physikalischen Bedingungen in beiden Fällen darin aus einander, dass die Oeffnungen am Boden des Gefässes ins Freie münden, die Capillaren dagegen in Gefässe übergehen, die noch Widerstand bieten. In dem Bergmannschen Falle wächst der Wasserabfluss bei gleicher Grösse der Abzugsöffnungen direct, wie die Zahl derselben in einem verzweigten Röhrensysteme, dagegen ist zweifelhaft, in welchem Verhältniss die Zahl und Weite der Collateralröhren, welche bestimmt sind, das zuströmende Fluidum abzuleiten, zur Quantität des Abflusses stehe.

*) Handwörterbuch der Physiologie von R. Wagner II. 219.

Um zur Beurtheilung dieses Verhältnisses empirische Unterlagen zu gewinnen, habe ich Versuche angestellt, welche im Folgenden beschrieben werden sollen.

§ 42. In dem schon oben beschriebenen Röhrensysteme (§ 33)



wurde bei B' in dem zweiten Abschnitte und bei C in dem dritten Abschnitte ein Hahn angebracht, dessen Bohröffnung die Weite der Röhren hatte. Wurde der Hahn bei C geschlossen, so konnte das Wasser durch die Röhre, an welcher er angebracht war, nicht durchtreten, floss also im dritten Abschnitte nur durch drei Collateralröhren, statt durch vier, im Ganzen aber nur durch 9 Röhrensegmente, statt vor Schliessung des Hahnes durch 10.

Wurde dagegen der Hahn bei B' geschlossen, so wurde die Strömung ausser in der Röhre B' auch noch in den Röhren C'' C''' D' unterdrückt, das Wasser floss im dritten Abschnitte nur durch zwei Abflussröhren statt durch vier, und bewegte sich im Allgemeinen nur durch 6 Röhrensegmente, statt vor Schliessung des Hahnes durch 10.

Wurden endlich beide Hähne verschlossen, so blieben gar keine Collateralröhren, übrig, das Wasser floss durch 5 der Länge nach an einander gefügte Röhrensegmente, nämlich durch A $B'C'$ DE. Da nun die Adhäsionsfläche, F, jeder Röhre $= 1{,}1043$ □ Decimeter ist, so betrug die gesammte Adhäsionsfläche in Beobachtung:

1) bei offnen Hähnen. . . . . 10 $F = 11{,}043$ □ Decimet.
2) bei Verschluss des Hahnes in C 9 $F = 9{,}939$ »
3) bei Verschluss des Hahnes in B' 6 $F = 6{,}626$ »
4) bei Verschluss beider Hähne . . 5 $F = 5{,}522$ »

Die hier erwähnten 4 Beobachtungen wurden bei gleicher Fallhöhe, H, von 294 Millimeter angestellt. Das Wasser, welches im Zeitraume von 2 Minuten abfloss, wurde gewogen und hieraus die Stromschnelle für eine Secunde $= v$ berechnet. Nach der Formel $\frac{v^2}{4g}$ ergab sich die Geschwindigkeitshöhe h, und da $H - \frac{v^2}{4g} = w$, so liess sich der Widerstand berechnen.

Bemerkt wurde ferner der Seitendruck in sämmtlichen Druckmessern, und aus der Seitendruckdifferenz zwischen a und b war der Seitendruck am Anfange des Systems $= S$ berechenbar (§ 6). Nun ist $w = S + \varsigma$ (§ 20), also $w - S = \varsigma$, womit ς gegeben, und das nicht unwichtige Verhältniss $\frac{\varsigma}{S}$ berechenbar war.

Die nachstehende Tabelle giebt über die beobachteten und aus den Beobachtungen abgeleiteten Werthe Aufschluss. Sie giebt auch Aufschluss über die Grösse des unechten Bruches $\frac{H}{S}$, dessen Werth, wie früher gezeigt wurde, mit dem von ς in Beziehung steht.

Tabelle

zur Begutachtung des Einflusses, welchen Collateralröhren in verzweigten Röhrensystemen auf die Bewegung der durchströmenden Flüssigkeiten ausüben.

Beobachtung	Grösse der Adhäsionsfläche in Decimetern.	Abfluss in 2 Minuten.	v	h	w	S	ς	$\frac{\varsigma}{S}$	$\frac{H}{S}$
1.	11,043	3350 Gr.	719	26,5	267,5	250	17,5	$\frac{1}{14,7}$	1,176
2.	9,939	3280 »	704,3	25,4	268,6	253	15,6	$\frac{1}{16,2}$	1,162
3.	6,626	2620 »	562,6	16,18	277,8	270	7,8	$\frac{1}{34,6}$	1,089
4.	5,522	2430 »	521,7	13,9	280,1	272	8,1	$\frac{1}{33,5}$	1,081.

Es ergiebt sich aus diesen Beobachtungen:

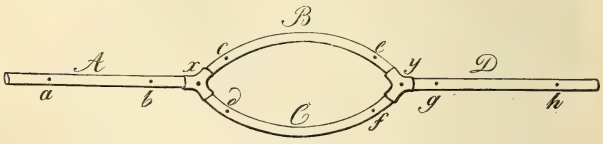
1) eine Verminderung der Adhäsionsfläche in verzweigten

Röhrensystemen, welche durch Verstopfung von Collateralarmen erzielt wird, vermehrt den Widerstand, statt ihn zu verringern.

2) Verminderung der Zahl der Collateralröhren, welche einem und demselben Abschnitte angehören, hat zwar eine Steigerung der Widerstände, aber keine jener Verminderung proportionale Steigerung zur Folge. So vermindert beispielsweise Verstopfung einer Collateralröhre von vieren im dritten Abschnitte unseres Apparates den Wasserabfluss nicht um $\frac{1}{4}$, sondern ungefähr um $\frac{1}{4\frac{1}{8}}$; desgleichen vermindert Verstopfung einer Collateralröhre von zweien im zweiten Abschnitte den Wasserabfluss nicht um $\frac{1}{2}$, sondern um $\frac{1}{4,5}$.

3) Es bestätigen sich die früheren Angaben über die Verhältnisse des Werthes ς. Derselbe ist hier, wo viele Widerstandsursachen ins Spiel kommen, eine geringfügige Grösse und wird mit Zunahme der Widerstände immer unbedeutender. Nur die letzte Beobachtung fällt aus der Reihe, was bei Annahme sehr geringer Beobachtungsfehler begreiflich ist. Ebenso bewährt sich, dass ς um so kleiner wird, jemehr sich der unechte Bruch $\frac{H}{S}$ der Einheit nähert.

§ 43. Noch fruchtbarer für die Physiologie des Kreislaufes sind folgende Beobachtungen. Ich construirte nach dem Schema der nachstehenden Figur einen Apparat aus 4 Zinnröhren, welche in Bezug auf Länge und Weite denen des grossen Apparates (§ 32) gleichkommen.



Jede Röhre war also 500 Millimeter lang und hatte eine Durchschnittsfläche von 38,81 □Millimeter. Die erste Röhre *A* dieses kleinen Apparates war in ein Gefäss *H* eingeführt, welches mit

Hülfe des schwimmenden Hebers gleichmässig voll Wasser gehalten wurde. Auch hier sammelte ich das binnen 2 Minuten ausfliessende Wasser, um die Geschwindigkeit der Strömung berechnen zu können, und bestimmte aus der Druckdifferenz bei a und b den Seitendruck an der Einflussmündung des Apparates.

Die erhaltenen Werthe erlauben nun einen Vergleich zwischen dem Versuche mit dem eben erwähnten kleinen Apparate und dem früher beschriebenen Experimente mit dem grösseren. Man wird bei diesem Vergleich zu berücksichtigen haben erstens: dass sich die Adhäsionsfläche des kleinen Apparates zu der des grossen verhielt wie 4 : 10; ferner: dass die Länge des kleinen Apparates zu der des grossen sich verhielt wie 3 : 5, und endlich: dass in dem kleinen Apparate die Zahl der Winkel, an welche der Strom sich stossen musste, nur 2, im grossen Apparate dagegen 6 betrug. Vergleichen wir jetzt die in beiden Experimenten gewonnenen Werthe, so ergiebt sich:

	H	Wasserabfluss in 2 Minuten nach Gr.	v	h	w	S	ε
grosser Apparat	294	3350	719	26,5	267,5	250	17,5
kleiner Apparat	294	3360	721	26,6	267,4	246	21,4.

Es ergiebt sich hieraus das überraschende Resultat, dass der grosse Apparat der Bewegung des Fluidums nicht mehr Hindernisse entgegensetzt, als der kleine. Der ganze Ueberschuss an Hemmungsmomenten, welche er unbestreitbar enthält, wird durch eine günstige Anlage der Collateralröhren ausgeglichen und unwirksam gemacht.

Betrachtet man die beiden Röhrenapparate als die Gefässsysteme zweier Thiere von ungleicher Grösse, und die Fallhöhe H als Herzkraft, so ergiebt sich, dass dieselbe Herzkraft ausreichen könne, das Blut durch den Körper eines grossen wie eines kleinen Thieres hindurchzutreiben, wenn nur die Colla-

teralgefässe den Abfluss des Blutes zu erleichtern geeignet sind. In der That scheint die statische Kraft des Herzens bei warmblütigen Thieren von den verschiedensten Grössen nur geringen Abweichungen zu unterliegen, eine Thatsache, auf welche wir später zurückkommen werden.

§ 44. Vermehrung der Blutbahnen durch Anbringung von Collateralgefässen kann also unter Umständen die Nachtheile beseitigen, welche Vermehrung der Adhäsionsfläche der Blutbewegung bereiten würde. Welches sind diese Umstände? Wir kennen sie zur Zeit noch nicht, und es ist fraglich, ob selbst die höhere Mathematik im Stande sein würde sie aufzuklären. Vielleicht dass überall der Strömung Vorschub geleistet und der, aus der vermehrten Adhäsionsfläche entspringende, Widerstand entweder ganz, oder doch theilweise annullirt wird, wenn Spaltung der Röhren mit Erweiterung des Strombettes verbunden ist.

Cap. IV.

Von der Wellenbewegung des Wassers in elastischen Röhren.

§ 45. Wenn Flüssigkeiten durch elastische Röhren strömen und statt durch eine stetige Kraft durch rhythmische Stösse getrieben werden (Bedingungen, welche bekanntlich beim Blutlauf statt finden), so entsteht eine Wellenbewegung. Die Gesetzlichkeit einer solchen Bewegung verdient um so mehr eine genaue Untersuchung, als sie unter sehr eigenthümlichen Bedingungen zu Stande kommt und nach der Theorie der Wellenbewegungen, wie sie von den Physikern aufgestellt worden ist, nicht ohne Weiteres beurtheilt werden kann.

So lange es nicht auf eine feinere Untersuchung der Phänomene ankommt, reicht es aus, an eine mit Wasser gefüllte Spritze einen mit Wasser gefüllten Darm zu binden und durch stossweises Fortschieben des Stempels das Fluidum in Bewegung zu setzen. Man legt dabei den Darm auf einen Tisch und sorgt dafür, dass die Ausflussmündung des letzteren ein wenig über dem Niveau liege, damit das Wasser nicht in Folge seiner Schwere ausfliesse, sondern nur auf Veranlassung des Druckes.

Wird jetzt der Stempel in die Spritze gestossen, so sieht und fühlt man an dem Darme eine pulsirende Bewegung. Liegt derselbe gerade, und ist die Ausflussmündung fixirt, so krümmt er sich bisweilen in geschlängelte Linien; ist dagegen die Ausflussmündung nicht fixirt, so streckt er sich in die Länge. Hieraus ergiebt sich eine Ausdehnung des Darmes, welche *a priori* angenommen werden musste, da der Schlauch schon vor dem Stosse der Spritze gefüllt war und ohne eine Erweiterung die nun eindringende Wassermasse nicht fassen konnte. Eine solche Erweiterung hätte nur dann ausbleiben können, wenn der Abfluss des Wassers ebenso schnell erfolgt wäre, als der Zufluss, was streng genommen nicht vorkommen kann.

Die Bewegung des Wassers pflanzt sich nur allmälig fort, denn hat der Darm eine hinreichende Länge, so strömt das Wasser aus der Ausflussöffnung nicht in dem Momente, wo der Stempel stösst, sondern etwas später. Dem entsprechend überdauert auch der Abfluss des Wassers den Stoss der Spritze. Wiederholt man die Stösse in kurzen Zwischenräumen, so fliesst das Wasser zwar continuirlich ab, aber es fliesst abwechselnd mehr oder weniger kräftig. Wiederum fliesst es nicht in dem Momente am kräftigsten, wo der Stoss erfolgt, sondern etwas später. Uebrigens ist dieser Wechsel in der Kraft der Strömung von der Länge des Darmes abhängig, so nämlich, dass die Differenz der Stromschnelle mit der Länge desselben abnimmt.

Alle diese Erscheinungen weisen unverkennbar darauf hin,

1) dass die durch stossweises Eindringen von Wasser veranlasste Erweiterung des Darmes eine von der Elasticität abhängige Contraction zu Folge habe;

2) dass diese Ausdehnung und unmittelbar darauf folgende Zusammenziehung nicht gleichzeitig im ganzen Schlauche auftreten, sondern im Verlaufe einer gewissen Zeit sich wellenförmig von der Einflussmündung gegen die Ausflussmündung hinwärts ausbreiten;

3) dass diese durch die ganze Länge des elastischen Schlauches sich fortpflanzende Ausdehnung und Zusammenziehung eine von dem Fliessen vollkommen untrennbare Bewegung ist, indem jene Ausdehnung und Zusammenziehung und dieses Fliessen sich wie Ursache und Wirkung verhalten.

§ 46. Um die Verhältnisse der Wellenbewegung des Wassers in elastischen Röhren genauer kennen zu lernen, experimentirte ich mit einem schicklicheren Apparate, als der vorherbeschriebene. Der Darm wurde mit einem Wasserbehälter durch einen messingnen Hahn in Verbindung gebracht, so dass ein abwechselndes Oeffnen und Schliessen desselben die Stösse der Spritze ersetzte. Diese Einrichtung gewährt den Vortheil, die Kraft jedes einzelnen Druckes messen zu können, indem die Grösse desselben offenbar der Höhe des Wasserstandes über der Einflussöffnung des Hahnes proportional sein musste.

Um einen regelmässigen Rhythmus der Stösse zu erzielen, wurde der Hahn mit einem Pendelapparate in Verbindung gesetzt. Die Schwingungen des Pendels hatten zur Folge, dass bei der einen Excursion der Hahn vollständig geöffnet, bei der anderen ebenso vollständig geschlossen wurde. Uebrigens liess sich der Pendel verlängern und verkürzen, also der Rhythmus verlangsamen und beschleunigen.

Um endlich die Wellen beobachten zu können, wurden an dem Darme gläserne Druckmesser auf ähnliche Weise ange-

bracht, als früher an den starren Röhren. In diesen Druckmessern stieg das Wasser bei jeder Oeffnung des Hahnes und fiel bei jedem Verschlusse; es war also die Druckdifferenz im Verlaufe der Zeit, und mit ihr die Grösse der Wellen messbar. Man wird nämlich nicht verkennen, dass die Grösse der Welle und die Differenz des Seitendruckes sich deckende Werthe sind. Beide sind abhängig von der Volumenvermehrung des schon vorhandenen Wassers durch das nachträglich eingestossene. Je grösser das Volumen des überschüssigen Wassers ist, um so grösser wird die Bergwelle, um so grösser also auch die Expansion des Schlauches und der sie begleitende Druck.

In das Endstück des Darmes war eine kurze Messingröhre eingebunden, an welche sich eine ungefähr fingerhutförmige Kapsel anschrauben liess. In dieser Kapsel war eine Oeffnung angebracht, durch welche das Wasser abfloss. Natürlich hing nun von der Weite dieser Ausflussmündung die Geschwindigkeit der Strömung ab. Solcher Kapseln hatte ich drei, mit verschieden grossen Mündungen, und ich war hierdurch in den Stand gesetzt, die Widerstände, welche das Fliessen behinderten, beliebig zu verändern.

Mit Hülfe dieses Apparates konnte ich hoffen, einige der wichtigsten Fragen ihrer Erledigung näher zu bringen, nämlich:

1) Wie verändert sich die Welle bei ihrem Verlaufe durch den elastischen Schlauch?

2) Welchen Einfluss hat auf die Grösse der Welle die Kraft des Druckes, durch welchen sie erzeugt wird?

3) Hat die Frequenz der Stösse einen Einfluss auf die Wellengrösse?

4) In welchem Verhältnisse steht die Grösse der Wellen zu den Widerständen?

§ 47. Ich will nicht unterlassen auf die Unvollkommenheiten meines Apparates selbst aufmerksam zu machen.

Die Grösse der Wellen wird durch die Weite der Röhren und durch den Grad ihrer Elasticität bestimmt, aber beide Grössen sind nicht gehörig bestimmbar. Anlangend die Weite, so würde es überhaupt schwierig sein, dieselbe für eine elastische Röhre genau zu ermitteln, aber die Bestimmung wird dadurch noch misslicher, dass, sobald der Apparat spielt, der Druck vom Anfange der Röhre gegen ihr Ende stetig abnimmt. Nun erleidet auch die Weite der Röhre eine entsprechende Abnahme, und die Röhrensegmente, welche zwischen zwei Druckmessern liegen, sind also selbst bei gleicher Länge noch ungleich in Bezug auf ihre Weite. Ferner wird es ganz unmöglich sein dafür einzustehen, dass der Elasticitätscoëfficient aller Röhrensegmente vollkommen derselbe sei. Ich habe statt Därmen in mehreren Versuchsreihen Kautschukröhren angewendet, habe aber noch viel grössere Unregelmässigkeiten bemerkt, als bei Anwendung von Därmen, zu denen ich schliesslich zurückgekehrt bin. Eine Quelle von Irrungen liegt in der Befestigung der Wellenmesser. Da diese an den Därmen unmittelbar nicht angebracht werden konnten, so waren sie in kurze Messingröhren rechtwinklig eingelassen, und die Enden dieser Röhren wurden in die Darmstücke eingeführt und eingebunden. Obschon der Durchmesser dieser messingnen Verbindungsstücke dem der Därme sehr nahe stand, so musste doch ihr Mangel an Elasticität für die Fortsetzung der Wellen ein Hinderniss abgeben.

Freilich werden selbst die für einen und denselben Wellenmesser notirten Zahlen noch mit Vorsicht hingenommen werden müssen. So beispielsweise die Werthe der Wellengrössen. Man kann sich nämlich vorstellen, dass bei den verschiedenen Fallhöhen der Elasticitätscoëfficient Veränderungen erleide, und dies würde auf die Grösse der Wellen nothwendig einen Einfluss haben. Gesetzt nun, dies fände wirklich statt, so wäre die Veränderung der Wellengrösse nicht eine Folge der veränderten Druckhöhe, sondern theilweise Folge einer Bedingung, welche in unsern Versuchen ignorirt wird.

Glücklicher Weise influenziren alle diese Uebelstände nur die eine der von uns aufgestellten Fragen wesentlich, die nämlich: wie sich die Welle in ihrem Verlaufe durch den elastischen Schlauch verändere. Indem die verschiedenen Abschnitte des elastischen Schlauches sich nicht unter ganz gleichen Verhältnissen befinden, ist die Frage, wie sich die Welle in den verschiedenen Abschnitten verhalten solle, nicht mit Genauigkeit zu beantworten. Anlangend die 3 anderen Fragen nach dem Einflusse, welchen die Kraft der Stösse, die Frequenz des Rhythmus und der Grad der Widerstände auf die Wellengrösse ausüben, so scheinen die an einem einzigen Wellenmesser erhaltenen Resultate allerdings massgebend, zwar nicht für das Verhältniss der wirkenden Bedingungen zu dem bewirkten Erfolge, wohl aber für die Richtung des letztern. Ich will sagen: Die Beobachtungen an einem Druckmesser reichen aus zu zeigen, ob Vermehrung des Druckes, Beschleunigung des Pulses und Steigerung der Widerstände eine Vergrösserung oder Verkleinerung der Wellen im Gefolge haben.

Abstrahirt von den angegebnen Uebelständen, so ist der Apparat zur Untersuchung der Wellenbewegung äusserst brauchbar. Wird der Wasserbehälter, aus welchem das elastische Rohr seinen Zufluss erhält, durch einen schwimmenden Heber stets voll erhalten, so gleicht sich ziemlich bald, nachdem der Pendel zu spielen begonnen, Zufluss und Abfluss vollständig aus, worauf das Wasser in allen Wellenmessern so überaus gleichmässig undulirt, dass von dieser Seite die Beobachtungen das grösste Zutrauen verdienen.

§ 48. Zum vollständigen Verständniss der von mir angestellten Experimente dürfte noch Folgendes zu bemerken sein:

Als elastischer Schlauch diente in meinen Versuchen der Dünndarm einer jungen Ziege, welcher annäherungsweise 45 Millimeter im Umfange hatte. Das zwischen dem Hahne und dem ersten Wellenmesser gelegene erste Darmstück hatte eine Länge

von 160 Millimeter. Jedes Darmstück zwischen zwei Wellenmessern mass 700 Millimeter, aber das Endstück hinter dem letzten Wellenmesser 1850 Millimeter.

Die messingnen Röhren, welche als Verbindungsstücke der Därme und als Träger der vier Wellenmesser dienten, hatten eine Länge von 40 und einen Durchmesser von 12 Millimeter. Dieselben Dimensionen hatte ein Stück Röhre, welches in das Ende des Darms eingebunden war, und an welches die oben beschriebenen Kapseln, mit Ausflussöffnungen von verschiedener Grösse, angeschraubt werden konnten.

Der Durchmesser dieser Ausflussöffnungen betrug bei *a* 2,6 Millimeter, bei *b* 3,5 Millimeter, bei *c* 5,1 Millimeter.

In den nachstehenden Tabellen ist hierauf Rücksicht zu nehmen, indem die Ausflussöffnungen nur mit den Buchstaben notirt sind.

In jedem der vier Wellenmesser ist das Maximum und Minimum der Oscillationswerthe, oder die positive und negative Welle gemessen worden. In den Tabellen finden sich diese Werthe unter den Bezeichnungen Höhe und Tiefe angeführt. Die Differenz des Höhen- und Tiefenstandes giebt die Wellengrösse, welche von mir für jeden Fall berechnet worden ist. Ebenso habe ich die halbe Summe des Höhen- und Tiefenstandes berechnet und in den Tabellen als Mitteldruck angegeben, eine Bezeichnung, welche nicht unverständlich sein kann, nachdem ich oben erwiesen habe, dass die Grösse der Welle und die Grösse des Seitendrucks an dieselbe Bedingung der eingestossenen Wassermenge gebunden sind.

Die Fallhöhe *H*, bei welcher experimentirt wurde, und die Zahl der Pulse für den Zeitraum einer Secunde sind bei jeder Beobachtungsreihe in der Ueberschrift angegeben. Man bemerke, dass die Zahl der Pulse nicht der Zahl der Pendelschwingungen gleich, sondern halb so gross als diese ist. Mit der ersten

Schwingung wurde der Hahn geöffnet, mit der zweiten geschlossen, mit der dritten wieder geöffnet u. s. w. Hiermit hängt auch die grosse Trägheit des Pulses in meinen Experimenten zusammen. Hätte das Pendel so verkürzt werden sollen, dass es 60—70 Pulse vermittelt, d. h. 120—140 Schwingungen in einer Minute gemacht hätte, so hätte es nicht Kraft genug gehabt, die Bewegung des Hahnes auszuführen, die ihm oblag.

§ 49. In den nun folgenden Tabellen sind die vier Wellenmesser nur mit den Buchstaben *A*, *B*, *C*, *D* bezeichnet, wobei sich von selbst versteht, dass *A* der Einflussmündung zunächst liegt. Alle Zahlenwerthe sind in Millimetern ausgedrückt.

Tabelle I.

Fallhöhe = 250 Millimeter; Pulsfrequenz in 1 Minute = 31.

Ausflussöffnung	Höhenstände				Tiefenstände				Mitteldruck				Wellengrösse			
	A	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*
a	278	254	228	241	155	176	190	173	216	215	209	207	123	78	38	68
b	278	252	223	216	120	141	150	132	199	196	186	174	158	111	73	84
c	254	223	205	184	80	84	84	77	167	153	144	130	174	139	121	107

Tabelle II.

Fallhöhe = 400 Millimeter; Pulsfrequenz = 31.

Ausflussöffnung	Höhenstände				Tiefenstände				Mitteldruck				Wellengrösse			
	A	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*
a	437	397	382	400	280	315	323	303	358	356	352	351	151	82	59	97
b	435	384	354	370	205	247	256	227	320	315	305	298	230	137	98	143
c	403	340	305	282	120	147	144	116	261	243	225	199	283	193	161	166

Tabelle III.

Fallhöhe = 550 Millimeter; Pulsfrequenz = 31.

Ausflussöffnung	Höhenstände				Tiefenstände				Mitteldruck				Wellengrösse			
	A	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*
a	583	548	540	547	432	465	466	455	507	506	503	501	151	83	74	92
b	580	522	511	515	333	385	383	364	456	453	447	436	247	137	128	151
c	536	446	414	405	193	236	222	180	364	341	318	297	343	210	192	225

Tabelle IV.

Fallhöhe = 250 Millimeter; Pulsfrequenz = 41 in 1 Minute.

Ausflussöffnung	Höhenstände				Tiefenstände				Mitteldruck				Wellengrösse			
	A	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*
a	274	264	247	242	182	186	201	201	228	225	224	221	92	78	46	41
b	275	259	241	218	140	145	159	165	207	202	200	191	135	114	82	53
c	260	220	210	188	70	85	80	88	165	152	145	138	190	135	130	100

Tabelle V.

Fallhöhe = 400 Millimeter; Pulsfrequenz = 41.

Ausflussöffnung	Höhenstände				Tiefenstände				Mitteldruck				Wellengrösse			
	A	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*
a	434	405	387	380	305	332	347	344	369	368	367	362	129	73	40	36
b	433	393	365	346	230	260	285	279	331	326	325	312	203	133	80	67
c	405	350	315	273	127	148	160	158	266	249	237	275	278	202	155	115

Tabelle VI.

Fallhöhe = 550 Millimeter; Pulsfrequenz = 41.

Ausflussöffnung	Höhenstände				Tiefenstände				Mitteldruck				Wellengrösse			
	A	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*
a	578	545	525	523	442	469	480	478	510	507	502	500	136	76	45	45
b	579	524	493	472	347	386	414	401	463	455	453	436	232	138	79	71
c	540	462	413	380	194	230	253	232	367	346	333	306	346	232	160	148

§ 50. Die mitgetheilten Erfahrungen lassen darüber keinen Zweifel übrig, dass die verschiedenen Bedingungen, unter welchen wir die Wellen beobachteten, auf die Grösse derselben Einfluss haben. Dieser Einfluss ist meistens einer bestimmten Norm unterworfen, d. h. die Wellengrösse verändert sich nach einer bestimmten Richtung, wenn die Kraft, welche sie mit bedingt, sich ebenfalls in einer bestimmten Richtung ändert. Nur in wenigen Fällen ist dem nicht so.

Es kann nun die Frage entstehen, ob das Anormale im Gange der Erscheinungen in den selteneren Fällen, wo es überhaupt vorkommt, auf Beobachtungsfehlern beruhe. Wahrscheinlich ist dies nicht der Fall, sondern die scheinbare Abnormität dürfte selbst wieder der Ausdruck einer complicirteren Gesetzlichkeit sein, welche von Bedingungen abhängt, die vorläufig verborgen sind. Ich werde später Gelegenheit haben, hierauf zurückzukommen.

Die von mir angestellten Versuche berücksichtigen 4 Bedingungen, welche auf die Bildung der Welle einen Einfluss ausüben; sie berücksichtigen ferner bei der Bildung jeder Welle 4 Verhältnisse, den Höhenstand, den Tiefenstand, den Mitteldruck und die Wellengrösse. Die gewonnenen Resultate werden demnach 16 Fragen beantworten, und wir können diese Antworten als ebensoviel Erfahrungssätze hinstellen, obschon zugegeben werden muss, dass mehrere derselben der Allgemeingültigkeit entbehren und nur brauchbar sind, in wiefern sie andeuten, wo neue Untersuchungen Noth thuen.

§ 51. Von den Veränderungen, welche die Wellen in ihrem Verlaufe erleiden.

Erfahrungssatz 1. Die Höhenstände nehmen abwärts von der Einflussmündung allmälig ab. — Unter den 18 hierher bezüglichen Erfahrungen (nämlich 3 in jeder der 6 mitgetheilten Tabellen) kommen nur 5 Ausnahmen vor.

Erfahrungssatz 2. Die Tiefenstände nehmen im Anfange des elastischen Schlauches an Werth zu, erreichen einen Cul-

minationspunkt und sinken dann gegen das Ende des Schlauches. — Die Fälle, wo der Tiefenstand bis in den letzten Wellenmesser stieg, können begreiflicher Weise nicht als Ausnahmen gelten, da der bemessene Punkt noch weit vom Ende des Schlauches entfernt war. Unter den 18 Beobachtungen befindet sich nur eine Ausnahme, in *Tab. IV C*, welche wahrscheinlich auf einem Beobachtungsfehler beruht.

Erfahrungssatz 3. Der Mitteldruck nimmt vom Anfange des Schlauches gegen das Ende ohne Ausnahme ab.

Erfahrungssatz 4. Die Wellen werden in ihrem Verlaufe kleiner. — Unter 21 Beobachtungen, welche ich hierüber anstellte, fanden sich indess 8 Ausnahmen. *)

§ 52. Von dem Einflusse der bewegenden Kraft *H* auf die Wellenbewegung.

Erfahrungssatz 5. Die Höhenstände wachsen mit Zunahme von *H* ohne Ausnahme.

Erfahrungssatz 6. Die Tiefenstände wachsen mit Zunahme von *H* ohne Ausnahme.

Erfahrungssatz 7. Der Mitteldruck wächst gleichzeitig mit *H* ohne Ausnahme.

Erfahrungssatz 8. Mit Vermehrung der bewegenden Kraft wächst die Wellengrösse. — Die Tabellen enthalten über diesen Punkt 72 Beobachtungen, unter welchen 8 Ausnahmen vorkommen.

§ 53. Von dem Einflusse der Pulsfrequenz auf die Wellenbewegung.

Erfahrungssatz 9. Die Höhenstände scheinen mit zunehmender Frequenz des Pulses ebensowohl steigen als fallen zu können.

---

*) In den 6 Tabellen finden sich zwar nur 13 Beobachtungen, die 3 noch übrigen werden jedoch später noch mitgetheilt werden.

Erfahrungssatz 10. Der Werth der Tiefenstände steht mit der Häufigkeit des Pulses in keiner festen Beziehung, doch steigt er in den meisten Fällen, wenn die Frequenz zunimmt.

Erfahrungssatz 11. Der Mitteldruck kann bei zunehmender Pulsfrequenz sowohl steigen als fallen, doch ist das Steigen häufiger bemerkt worden.

Erfahrungssatz 12. Die Wellengrösse pflegt bei Beschleunigung des Pulses abzunehmen, doch kommen zahlreiche und bisweilen so grosse Ausnahmen vor, dass die Erklärung dieses Gegensatzes durch Beobachtungsfehler nicht zulässig scheint.

§ 54. Von dem Einflusse der Widerstände auf die Wellenbewegung.

Erfahrungssatz 13. Die Höhenstände wachsen mit Zunahme des Widerstandes. In allen Beobachtungen kommen nur 2, nach dem Zahlenwerthe unbedeutende, Ausnahmen vor.

Erfahrungssatz 14. Die Tiefenstände wachsen mit Zunahme des Widerstandes ohne Ausnahme.

Erfahrungssatz 15. Der Mitteldruck wächst mit Zunahme des Widerstandes ohne Ausnahme.

Erfahrungssatz 16. Die Wellengrösse wird vermindert, wenn der Widerstand zunimmt. Dieser Satz erleidet keine Ausnahme.

§ 55. Die im Vorhergehenden erörterten Erfahrungen fordern zu weiteren Untersuchungen um so dringender auf, als die Ergebnisse hin und wieder noch unklar und unter sich selbst im Widerspruche sind. Der Grund hiervon liegt darin, dass Veränderungen in den 3 Causalmomenten, welche wir berücksichtigten (bewegende Kraft, Pulsfrequenz, Widerstand), in verschiedenen Abschnitten einer elastischen Röhre verschiedenartig wirken. So kann beispielsweise eine Steigerung der bewegenden Kraft in dem einen Abschnitt einer elastischen Röhre eine Vermehrung der Wellengrösse und in einem anderen eine Verminderung derselben zur Folge haben. Ja es kann sogar in dem-

selben Röhrenabschnitte eine fortgesetzte Steigerung der bewegenden Kraft abwechselnd positive und negative Effecte erzeugen, was offenbar davon abhängt, dass der Vorgang der Wellenbildung nicht blos Wirkung der von uns berücksichtigten Causalmomente, sondern Resultante noch weiterer, zum Theil versteckter Bedingungen ist. Die Aufsuchung dieser verborgenen Coëfficienten wird unsere nächste Aufgabe sein, nur bemerke ich im Voraus, dass ohne neue, nach einem andern Principe angestellte Versuche hier wesentliche Entdeckungen kaum zu hoffen sind.

Die Welle nimmt im Verlaufe an Grösse ab; die wenigen Ausnahmen, welche vorkommen, treten sämmtlich im letzten Wellenmesser und bei langsamer Pulsation auf.*) In 3 Beobachtungen, welche im Vorhergehenden nicht mitgetheilt wurden, und bei welchen der Puls auf 49 Schläge in einer Minute erhöht worden war, ist jenes Ausnahmeverhältniss nicht zum Vorscheine gekommen. Da nun Wellen in freiliegenden Flüssigkeiten im Verlaufe ebenfalls kleiner werden, so zweifle ich nicht, dass die Abnahme der Wellen im Verlaufe von elastischen Schläuchen als Norm gelte. Theoretische Gründe bestätigen diese Ansicht, wovon unten ausführlicher.

Es ist hinreichend bekannt, dass rollende Wellen, wenn sie auf einen Widerstand stossen (z. B. die Wellen eines Stromes auf Steine, noch unter dem Wasserspiegel), höher anschwellen, und so könnte die Erhebung der Welle im vierten Wellenmesser in den wenigen Fällen, wo sie vorkommt, möglicher Weise auf einem latenten Widerstande beruhen.

Ich glaube sogar den Widerstand, welcher die Regelmässigkeit der Erscheinung stört, nachweisen zu können; aller Wahr-

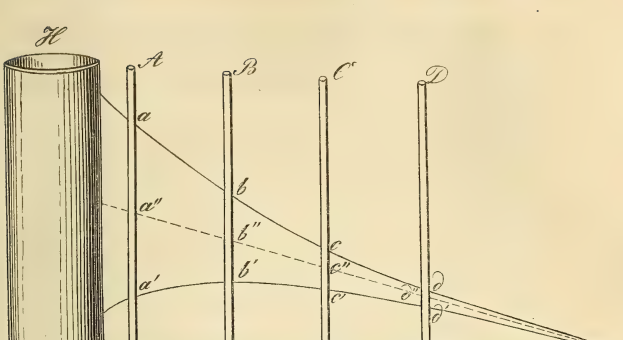
*) Die Versuche bei langsamem Pulse scheinen mir im Allgemeinen die minder zuverlässigen. Oefters bemerkte ich dann in den Wellenmessern ein ruckweises Sinken, eine Art *pulsus dicrotus*, wodurch das Ablesen der Höhen- und Tiefenstände ausserordentlich erschwert wurde.

scheinlichkeit nach geht er von dem Röhrchen mit verengter Ausflussöffnung aus, welches bei allen Versuchen am Ende des Darmes eingebunden war. Eine derartige Einrichtung musste wohl zu einer Art Brandung Anlass geben, bei welcher die Wellen wachsen. Diese Vermuthung wird dadurch bestätigt, dass, je kleiner die Ausflussmündung, je grösser das Anwachsen der Welle im letzten Wellenmesser.

Betrachtet man die wenigen Fälle, wo die Welle im Verlaufe an Grösse zunimmt, als Folgen zufälliger Störungen, so würde die Welle im Verlaufe durch den elastischen Schlauch nicht nur abnehmen, sondern in beschleunigtem Masse abnehmen. Berücksichtigt man nämlich die Differenzen der Wellengrössen, so zeigt sich, dass diese vom Anfange gegen das Ende des Schlauches, in der Regel wenigstens, eine Verminderung erfahren. Diese beschleunigte Abnahme entspricht ohne Zweifel dem gesetzlichen Verhältnisse, so dass die Ausnahmen, welche in den Tabellen vorkommen, auf Zufälligkeiten bezogen werden dürfen.

Ueber das Verhältniss, in welchem die Wellen allmälig abnehmen, würden wir vollkommen im Klaren sein, wenn wir die Curven der Höhen- und Tiefenstände genau kennten. Meine Beobachtungen genügen nicht, über den Gang dieser Curven einen sichern Aufschluss zu geben, aber sie geben Andeutungen, welche die Wahrscheinlichkeit für sich haben.

Betrachten wir in nachstehender Figur EE als einen elastischen Schlauch von gleichmässiger Weite, A, B, C, D als Wellenmesser, welche in gleichen Distanzen von einander liegen, und H als den Wasserbehälter, welcher durch rhythmisches Ausstossen von Wasser die Wellen verursacht, so ist die wahrscheinliche Curve der Höhenstände durch a, b, c, d, die der Tiefenstände durch a', b', c', d' und die des Mitteldruckes durch a'', b'', c'', d'' angedeutet. Der Figur nach ist $aa' : bb' > bb' : cc'$, oder mit Worten: Die Wellengrösse nimmt je näher der Einflussmündung um so rascher ab.



Will man die Berechtigung dieser idealen Curven an der Erfahrung prüfen, so muss man freilich von den einzelnen Beobachtungen, welche ich mitgetheilt habe, ganz abstrahiren und sich nur an Mittelwerthe halten.*) Die im Vorstehenden gegebenen Tabellen und die § 59 nach zu bringenden, enthalten über die Veränderungen der Wellengrösse im Ganzen 20 Beobachtungsreihen. Das Resultat aller dieser Beobachtungen zusammengenommen ist, dass sich die Wellengrösse in A zu der in B = 1,53 : 1 dagegen die Wellengrösse in B zu der in C = 1,41 : 1 verhält.**) Diese Verhältnisse bestätigen aber meine Betrachtung, die, wie ich unten zeigen werde, auch theoretisch gerechtfertigt ist.

Sind nun die Curven der Höhen- und Tiefenstände insoweit wenigstens richtig aufgefasst, was ich für unzweifelhaft halte, dass beide krumme Linien darstellen, welche in einer dem

*) Man vergleiche, was ich § 47 über die Unzuverlässigkeit der relativen Druckwerthe in den verschiedenen Wellenmessern gesagt habe.

**) Das Verhältniss der Wellengrösse in C zu der in D konnte hierbei nicht berücksichtigt werden, da nach dem oben Bemerkten die Welle in D unter dem Einflusse der Brandung steht.

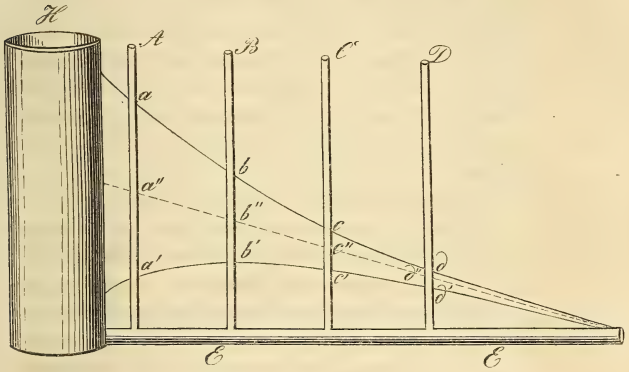
Strome entgegenlaufenden Richtung sich allmälig immer weiter von einander entfernen, so versteht es sich von selbst, dass die Wellen in ihrem Verlaufe nicht nur abnehmen, sondern in beschleunigtem Masse abnehmen.

§ 56. Wenn die Wellen in ihrem Verlaufe durch den elastischen Schlauch allmälig sich verkleinern, so ist die Ausdehnung, welche letzterer durch die eingetriebene Wassermasse erleidet, in den ersteren Abschnitten grösser als in den letzteren. Nun hängt aber die Ausdehnung des Schlauches von dem Volumen des eingetriebenen Fluidums ab, und dies Volumen kann sich nicht eher vermindern, als der Ausfluss desselben seinen Anfang genommen. Wiederum erfolgt der Abfluss, in Folge eines Stosses, erst dann, wenn dieser durch die ganze Länge des Schlauches hindurchgewirkt, also die Welle sich bis zur Ausflussmündung hindurchgearbeitet hat. Wenn nun die Welle, und mit ihr die Ausdehnung des Darmes, vermindert wird, noch ehe ein Ausfluss zu Stande kommt, so ist dieser scheinbare Widerspruch nur dadurch begreiflich, dass die ausdehnende Masse, d. h. die in den schon vollen Schlauch eingestossene überschüssige Quantität Flüssigkeit, sich über einen grösseren Theil der elastischen Röhre verbreitet hat. Nennt man die überschüssige Masse selbst Welle, so ist zu sagen: Die Welle wird im Verlaufe durch die elastische Röhre allmälig niedriger und dem entsprechend länger. Hiermit hängt zusammen, dass die Welle, je weiter sie verlaufen ist, um so weniger sich bemerkbar macht.

§. 57. Da die Masse Flüssigkeit, welche in den schon vollen Schlauch gestossen worden, diesen ausdehnt, so übt sie einen Seitendruck aus, dessen Grösse von dem Masse der Ausdehnung und folglich von der zeitweiligen Grösse der Wellen abhängt. Der Druck ist im Culminationspunkt der Bergwelle am grössten, bei vollkommen entwickelter Thalwelle am geringsten; der mittlere Werth aus dem Höhen- und Tiefenstand giebt also den Mitteldruck oder mittleren Seitendruck.

Meine Beobachtungen lehren, dass der mittlere Seitendruck,

wie bei gleichmässigem Fliessen in starren Röhren, so bei undulatorischem Fliessen in elastischen Schläuchen, von der Einflussmündung gegen die Ausflussmündung stetig abnehme. In allen meinen Beobachtungen, von welchen ich in den mitgetheilten Tabellen vielleicht nur den zehnten Theil vorgelegt habe, hat sich dieses Gesetz bis auf ein Paar ganz vereinzelte Ausnahmen immer geltend gemacht.*)



Jemehr man die stossweise Wirkung der bewegenden Kraft in einen gleichmässigen Druck verwandelt, um so mehr müssten sich die Höhenstände $a\ b\ c\ d$ einerseits, und die Tiefenstände $a'\ b'\ c'\ d'$ andrerseits dem Wasserstande des Mitteldrucks $a''\ b''\ c''\ d''$ nähern, und mit gänzlichem Verschwinden des Stosses würde ein gleichmässiges Fliessen eintreten, d. h. die Curven der Höhen- und Tiefenstände würden mit der Curve des mittleren Seitendrucks zusammenfallen.

Man kann sich die Linie $a''\ b''\ c''\ d''$ als die Oberfläche eines Stromes mit starkem Gefälle vorstellen, über welche bei eintre-

*) Dies mag, beiläufig bemerkt, darin seine Erklärung finden, dass der elastische Schlauch in allen Versuchen eine ziemlich gleichmässige Weite hatte, also zur merklichen Stauung nicht Anlass gab.

tendem Stosse Wellen hinrollen. Diese Wellen folgen dann den hinreichend bekannten Gesetzen der Wellenbewegung. Durch das plötzliche Eindringen einer Masse Flüssigkeit aus dem Behälter *H* entsteht eine Bergwelle und erhebt sich im ersten Abschnitte des elastischen Schlauches bis *a;* diese Welle sinkt zusammen zur Thalwelle; sie sinkt bis *a'*, d. h. ebenso tief unter den Wasserspiegel, als sie sich über denselben vorher erhoben hatte. Im zweiten Abschnitte entsteht wieder Berg- und Thalwelle, aber jene ist nicht so hoch, und diese nicht so tief, als im ersten Abschnitte, denn die Welle ist auf Kosten ihrer Höhe breiter, oder mit Bezug auf die Dimension des Schlauches länger geworden. In diesem Vorgange findet sich nichts, was nicht mit den allgemeinen Gesetzen der Wellenbewegung in Uebereinstimmung wäre.

§ 58. Anlangend den Einfluss der bewegenden Kraft auf die Wellen (vergl. § 52), so hat sich gefunden, dass die Zunahme derselben mit einem Anwachsen der Höhenstände, der Tiefenstände und der Mitteldrucke ohne Ausnahme verbunden ist. Nachdem ich in einem früheren Abschnitte den Zusammenhang zwischen Fallhöhe und Seitendruck, und in den letzten Paragraphen den Zusammenhang zwischen Welle und Seitendruck ausführlich erörtert habe, bedarf dieser Theil des Vorganges keiner weiteren Erläuterung.

Dagegen lässt sich noch fragen, warum die Wellengrösse zu *H* in wechselndem Verhältnisse stehe? Nach Erfahrungssatz 8 (§ 52) ist mit Vermehrung der Kraft *H* in den meisten Fällen, aber nicht immer, eine Steigerung der Wellengrösse verbunden. Zur Beurtheilung dieser Unbeständigkeit bedarf es noch der Mittheilung einiger Beobachtungen, welche ich im Nächstfolgenden vorlegen werde.

§ 59. Um den Einfluss der Pulsfrequenz auf die Wellenbewegung besser zu übersehen, werde ich noch eine Beobachtungsreihe mittheilen, welche in dem Vorhergehenden nicht enthalten ist. Ich habe bis jetzt nur Experimente zur Sprache gebracht,

wo die Zahl der Pulse in 1 Minute 31, in anderen Fällen 41 betrug; ich besitze noch eine Beobachtungsreihe, wo 49 Pulse statt hatten. Welche Folgen diese Vermehrung der Pulsfrequenz gehabt habe, wird man am besten übersehen, wenn ich die früheren Erfahrungen und die neueren tabellarisch neben einander stelle.

Tabelle VII.

Bewegende Kraft = 550 Mm. Durchmesser der Ausflussöffnung 2,6 Mm.

Pulsfrequenz	Höhenstände				Tiefenstände				Mitteldruck				Wellengrösse			
	A	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*
31	513	548	540	547	432	465	466	455	507	506	503	501	151	83	74	92
41	578	545	525	523	442	469	480	478	510	507	502	500	136	76	45	45
49	560	530		504	442	530		464	501	494		484	118	72		40

Tabelle VIII.

Bewegende Kraft = 550 Mm. Ausflussöffnung im Durchmesser 3,5 Mm.

Pulsfrequenz	Höhenstände				Tiefenstände				Mitteldruck				Wellengrösse			
	A	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*
31	580	522	511	515	333	385	383	364	456	453	447	430	247	137	128	151
41	579	524	493	472	347	386	414	401	463	455	453	436	136	76	45	45
49	557	505	475	452	355	380	410	400	456	442	441	426	202	125	63	52

Tabelle IX.

Bewegende Kraft = 550 Mm. Ausflussöffnung im Durchmesser = 5,1.

Pulsfrequenz	Höhenstände				Tiefenstände				Mitteldruck				Wellengrösse			
	A	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*	*A*	*B*	*C*	*D*
31½	536	446	414	405	193	236	222	180	364	341	318	297	343	310	192	225
41	540	462	413	380	194	230	253	232	367	346	333	306	346	232	160	148
49	528	450	396	351	200	226	256	268	364	338	326	309	328	224	140	83

Es bestätigt sich die schon § 53 gemachte Bemerkung, dass Veränderung in der Frequenz des Pulses sich mit ganz entgegengesetzten Verhältnissen in der Wellenbewegung verbinden könne. Dies liegt daran, dass die Wirkungen der Pulsfrequenz und andre bei der Wellenbewegung thätige Kräfte sich gegenseitig unterstützen und kreuzen können.

Unter Voraussetzung gleicher Fallhöhen und Widerstände kann Beschleunigung des Pulses zunächst dies zur Folge haben, dass weniger Fluidum mit einem Stosse in den elastischen Schlauch getrieben und folglich dieser weniger ausgedehnt werde. Mithin müssten bei Beschleunigung des Pulses die Wellengrössen abnehmen, gleichwohl findet oft das Gegentheil statt, und namentlich widerspricht die Tabelle VIII dieser Erwartung vollständig.

Sind die Fallhöhen und Widerstände verschieden, so lässt sich über den muthmasslichen Einfluss der Pulsfrequenz gar nichts aussagen, weil jene die Wellengrösse ebenfalls influenziren. Je grösser die Werthe H und w ausfallen, um so stärker wird der Seitendruck, um so gespannter der elastische Schlauch, und um so ähnlicher einer starren Röhre. Unter solchen Umständen werden die Wellen natürlich kleiner, denn die Grösse der Excursionen elastischer Membrane steht zur Stärke ihrer Spannung im umgekehrten Verhältniss.

Wenn nun die Stärke der Spannung auf die Grösse der Wellen einen Einfluss hat, so ist wichtig, zu bemerken, dass mit Steigerung der Pulsfrequenz die Spannung der elastischen Röhren bis zu einem gewissen Punkte steigt, aber über diesen Punkt hinaus wieder abnimmt. Nämlich die Spannung, als unmittelbare Folge des Seitendrucks, ist eine Function der Geschwindigkeit und wächst mit dieser, die Geschwindigkeit aber, mit welcher das Wasser durch den elastischen Schlauch fliesst, kann durch Beschleunigung der rhythmischen Stösse unter gewissen Umständen gefördert und unter andern behindert werden. Bei zu seltenem Pulse fehlt es an genügender Stosskraft, von welcher

die Bewegung allein abhängt; bei zu schnellem Pulse dagegen erfährt die Stosskraft zu häufige Unterbrechungen und wird, da jede Kraftäusserung Zeit braucht, verhindert, sich in ihrer vollen Grösse zu entwickeln. In meinem Apparate entstand diese der Stromschnelle nachtheilige Wirkung der Pulsfrequenz sehr zeitig. In zwei sehr ausgedehnten Beobachtungsreihen mit Kautschukröhren war der Wasserabfluss bei 34 Pulsen ohne Ausnahme bedeutender, als bei 39 Pulsen.

Aus dem Gesagten ist vollkommen begreiflich, dass Veränderung der Pulsfrequenz in Bezug auf die Grösse der Wellen ganz entgegengesetzte Effecte haben könne, indess behaupte ich nicht, dass so grosse Unterschiede in den Wellengrössen, wie sie in Tab. VIII bei verschiedener Pulsfrequenz auftraten, hiermit hinreichend erklärt sind.

Der eben erörterte Zusammenhang, zwischen Spannung des Schlauches und Wellengrösse einerseits, so wie Spannung und Pulsfrequenz andrerseits, erläutert manche Schwierigkeiten, welche ich gegenwärtig nur anzudeuten brauche. Es versteht sich nun von selbst, dass die Veränderung der Pulsfrequenz auf Höhenstände, Tiefenstände und Mitteldruck verschieden einwirken könne, und ebenso wird der am Ende des § 52 erwähnte Widerspruch dem Verständniss näher gerückt. Vermehrung der Fallhöhe kann für die Wellengrösse unterstützend und hemmend wirken. Mit wachsendem Werthe von *H* werden die Stösse heftiger, was die Wellengrösse begünstigt, andrerseits aber wird unter denselben Umständen auch die Spannung des Schlauches beträchtlicher, was die Wellengrösse behindert. Hiernach ist sehr wohl denkbar, dass Zunahme der Fallhöhe bis zu einem gewissen Punkte einen positiven, aber über diesen Punkt hinaus einen negativen Effect haben werde.

§ 60. Was den Einfluss der Widerstände auf die Wellenbewegung anlangt, so ergab sich, dass mit wachsendem Widerstande die Höhenstände, die Tiefenstände und der Mitteldruck ohne Ausnahme zunehmen. Dies versteht sich nach dem Voraus-

geschickten von selbst. Die Höhe der Welle, gleichviel ob diese Höhe einen positiven Werth hat, wie bei der Bergwelle, oder einen negativen, wie bei der Thalwelle, ist das Mass eines auf die elastischen Wandungen einwirkenden und diese Wandungen ausdehnenden Drucks. Natürlich muss die Masszahl an Werth gewinnen, wenn der Druck, welchen sie misst, an Werth zunimmt, und der Widerstand veranlasst eben eine Steigerung des Drucks, wie aus allem Vorausgehenden unzweifelhaft ist. Die Welle ändert momentan den Druck durch Hinzufügung eines positiven Werthes während der Bergwelle und eines eben so grossen, obschon negativen Werthes während der Thalwelle. Demnach müssen Höhen- und Tiefenstände um so grössere Zahlenwerthe haben, je grösser der Druck ist, zu welchem der entweder positive oder negative Wellendruck summirt wird.

Ebenso ist vollkommen verständlich, dass mit wachsendem Widerstande die Wellengrösse, d. h. der Unterschied der Höhen- und Tiefenstände, ohne Ausnahme abnimmt, denn je mehr der Druck und folglich die Spannung in Folge der Widerstände wächst, um so mehr nähert sich der elastische Schlauch einer starren Röhre, in welcher derartige Unterschiede ganz wegfallen.

§ 61. Die Bewegung der Wellen und das Fliessen sind in allen Fällen untrennbare Vorgänge, wo die Bewegung eines Fluidums durch elastische Röhren von einer Kraft ausgeht, welche nicht stetig, sondern stossweise das zu bewegende Fluidum eintreibt. In allen solchen Fällen ist das Fortrollen der Welle das alleinige Mittel der Fortschaffung des Fluidums.

Ein ausführlicher Beweis dieser Behauptung könnte fast überflüssig erscheinen, wenn nicht *E. H. Weber,* unbestreitbar die erste Autorität in dieser Angelegenheit, das Gegentheil anzunehmen schiene. Derselbe sagt in seinen Untersuchungen über den Puls: *unda enim non est materia progrediens, sed forma materiei progrediens,* und warnt vor Bichats Irrthum, welcher Wellenbewegung und Strombewegung verwechsle.

In der That giebt es eine Wellenbewegung, welche, wie *Weber* sich ausdrückt, nur auf einem Fortschreiten der Form der Masse, nicht auf einem Fortschreiten der Masse selbst beruht. So verhält es sich, wenn man einen Stein in einen Wasserbehälter fallen lässt, oder wenn man durch schnelles Ansaugen von Wasser in eine Röhre eine Störung im Niveau verursacht. Hat man einen Stein in einen Teich geworfen, so bewegen sich die Wellen von der Stelle des Stosses aus excentrisch nach allen Seiten, sie bewegen sich nach den Ufern hin, aber es fliesst nicht das Wasser nach den Ufern. Kleine Körper, welche auf der Oberfläche des Teiches schwimmen, verändern ihren Ort nicht, sie werden in die Höhe gehoben oder in die Tiefe gezogen, jenachdem sie von der Bergwelle oder Thalwelle ergriffen werden, aber sie bewegen sich nicht mit den Wellen nach den Ufern. Bei Weitem in den meisten Fällen beruht die Wellenbewegung nur auf einer Fortpflanzung der Form der Masse; in unserm Apparate dagegen und ebenso im Blutgefässsysteme beruht sie auf einer Fortpflanzung der Masse selbst. Der nähere Hergang ist folgender:

Die Herzkammer entleert mit jeder Systole eine gewisse Blutmenge, beim Menschen etwa 6 Unzen. Diese Blutmenge dringt in das gefüllte Arteriensystem mit grösserer Schnelligkeit ein, als sie abfliessen kann, und bewirkt demnach eine locale Ausdehnung der Arterien an deren Ursprunge. Mit dieser Ausdehnung ist eine Störung des Gleichgewichts gegeben, welche sich auf die Dauer nicht halten kann, vielmehr zieht sich die ausgedehnte Stelle, sobald die ausdehnende Gewalt, d. h. die Systole, nachlässt, zusammen und treibt die überschüssige Masse, welche sie vom Herzen erhalten, weiter. Der ausgedehnte Gefässabschnitt, welcher sich zusammenzieht, tritt der Function nach an die Stelle des Herzens, er entleert einen Theil seines Inhaltes in einen weiter abwärts liegenden Abschnitt, erweitert diesen und fördert gleichzeitig die überschüssige Masse, welche, nachdem sich dieser Prozess der Zusammenziehung, Ausdehnung und

Fortschaffung von Blut durch die ganze Ausdehnung des Arteriensystems wiederholt, in das Capillargefässsystem überfliesst. Der ausgedehnte Abschnitt des Gefässsystems entspricht der Bergwelle, derselbe Abschnitt im Momente der Contraction entspricht der Thalwelle, die Förderung des Blutes vom Anfang des Arteriensystems gegen dessen Ende ist also Folge des Ueberganges der Bergwellen in Thalwellen, d. h. eine Wirkung der Wellenbewegung. Wenn nun im vorliegenden Falle sich die Wellenbewegung nicht blos als Fortschreiten der Form der Masse, sondern als Fortschreiten der Masse selbst darstellt, so ist der einfache Grund hiervon der, dass die Bergwelle im Gefässsystem wirklich durch ein *plus* von Masse erzeugt ist und in die Thalwelle nur unter der Bedingung übergehen kann, dass dieses *plus* beseitigt, d. h. aus einem mehr aufwärts liegenden Gefässabschnitte in einen weiter abwärts liegenden verdrängt wird. Das oben erwähnte Beispiel von Wellen auf einem Teiche hat auf die Beurtheilung der Pulswellen keinen Einfluss, denn wenn ein Stein in das Wasser geworfen wird, entstehen die positiven Wellen ausschliesslich durch den Stoss, und von einem Ueberschuss an Masse ist nicht die Rede.

§ 62. Sollte nach dem Vorausgeschickten noch ein Bedenken übrig bleiben, so wäre es dies, wie sich die überaus schnelle Wellenbewegung mit der Langsamkeit der Strömung in Einklang bringen lasse.

Die Welle verbreitet sich in der Zeit eines Pulsintervalles von der Kammer bis zum entsprechenden Vorhofe, ebenso schnell bewegt sich die überschüssige Blutmasse, d. h. beim Menschen die Quantität von 6 Unzen Blut. Dies kann gar nicht anders sein, denn nothwendig muss im Intervall zweier Pulse dem Vorhof genau so viel Blut zugeführt werden, als die Kammer bei jedem Pulse entleeren soll. Bestände die Blutbewegung ausschliesslich im Strömen der vom Ventrikel entleerten 6 Unzen, so würde in der That die Geschwindigkeit der Strömung und die der Pulsbewegung gleich schnell vor sich gehen. Indess be-

wegt sich die vom Ventrikel entleerte Blutmenge nicht allein, sondern theilt ihre Bewegung auch der Blutmasse mit, welche bereits vor dem Pulse die Arterien anfüllte. Natürlich wird nun die Blutmasse im Ganzen sich langsamer bewegen. Setzen wir, die 6 Unzen Blut verhielten sich zu der Blutmasse des Gefässabschnitts, in welchem sie die Bergwelle veranlassen, wie 1 : 10, so wird sich auch die Schnelligkeit der Strömung zur Schnelligkeit der Wellenbewegung wie 1 : 10 verhalten. Eine 10 Mal langsamere Bewegung von 60 Unzen leistet für die Förderung des Fluidums dasselbe, als eine 10 Mal schnellere Bewegung von 6 Unzen.

§ 63. Es bleibt noch eine Frage zu lösen übrig, für die Physik des Kreislaufes vielleicht die wichtigste, die Frage nämlich, ob auch bei stossweiser Bewegung der Fluida durch elastische Schläuche die Geschwindigkeit der Strömung und der Druck in demjenigen gesetzlichen Verhältnisse zu einander stehen, welches durch die Formel $w = av^2 + bv$ gegeben ist.

Die Frage hat bei dem unaufhörlichen Wechsel des Drucks nur dann einen Sinn, wenn wir vom mittleren Drucke sprechen, welcher nach früheren Erörterungen erhalten wird, wenn man die Summe des Höhen- und Tiefenstandes oder der Berg- und Thalwelle mit 2 dividirt. Ich habe diesen mittleren Druck dem Seitendrucke verglichen, welcher bei gleichmässiger Bewegung der Fluida durch Röhren statt findet, und dieser Vergleich würde sich rechtfertigen, wenn es möglich wäre, den Mitteldruck als w in die eben erwähnte Formel einzuführen. Dies ist nun wirklich der Fall.

Ich habe mit dem § 46 beschriebenen Apparate eine Reihe von Versuchen über Wellenbewegung in der Weise angestellt, dass ich bei verschiedenen Fallhöhen, im Uebrigen aber unter ganz gleichen Bedingungen den Druck und die Geschwindigkeit der Strömung notirte. Anlangend den Druck, so wurden die Höhenstände und die Tiefenstände nur im ersten Wellenmesser angemerkt und aus ihnen der Mitteldruck berechnet; was aber

die Geschwindigkeit betrifft, so wurde sie nach der Quantität der Wassermasse bestimmt, welche in einem Zeitraum von zwei Minuten abfloss. In der nachstehenden Tabelle bezieht sich der Zahlenwerth von v auf die binnen 2 Minuten abgeflossene Wassermenge in Grammen.

Aus 6 Beobachtungen habe ich nach der Methode der kleinsten Quadrate die Widerstandscoëfficienten berechnet und fand $log.\ a = 0{,}83374 - 5$ und $log.\ b = 0{,}08092 - 2$.

Ich werde nun mit Hülfe dieser Coëfficienten aus den beobachteten Geschwindigkeiten die Widerstände berechnen und sie mit den beobachteten Widerständen oder Mitteldruckwerthen vergleichen.

Beobachtungen am Wellenmesser			Widerstand oder Mitteldruck		
Höhenstand	Tiefenstand	v	beobachtet	berechnet	Differenz
375	175	1912	275	272,3	$-\frac{1}{102}$
418	204	2058	311	321,5	$+\frac{1}{29}$
464	250	2215	357	361	$+\frac{1}{89}$
505	295	2345	400	403,2	$+\frac{1}{125}$
540	336	2455	438	440,6	$+\frac{1}{313}$
578	372	2547	475	473,1	$-\frac{1}{249}$

Bei dieser vortrefflichen Uebereinstimmung der beobachteten und berechneten Werthe kann kein Zweifel sein, dass unsere oben erörterten hydrodynamischen Gesetze auch bei der Wellenbewegung sich geltend machen. Ich halte dies für eines der wichtigsten Resultate meiner Untersuchungen, indem nun erst die Anwendung der Hydrodynamik auf die Vorgänge der Blutbewegung berechtigt scheint.*)

*) Die Erscheinungen des ruhigen Fliessens bei gleichbleibender Fallhöhe und in starren Röhren sind so verschieden von den Phänomenen der Wellenbewegung, welche bei rhythmischen Stössen in elastischen Röhren

§ 64. Wenn man eine elastische Röhre, durch welche stossweise ein Fluidum strömt, seitlich ansticht, so spritzt die Flüssigkeit aus der Seitenöffnung bald mehr, bald weniger weit nach aussen. In dem Momente, wo der Stoss erfolgt und demnach die positive Welle entsteht, erfolgt das Spritzen in einem grösseren Bogen, was auf eine vermehrte Geschwindigkeit der Stromschnelle hinweist. Es coincidiren also während der positiven Welle vermehrter Druck und vermehrte Geschwindigkeit, dagegen während der negativen Welle verminderter Druck und verminderte Geschwindigkeit. Die im vorigen Paragraphen erörterten Verhältnisse erklären diese Coincidenz vollkommen. Da nämlich der Mitteldruck des in Wellen strömenden Fluidums eine Function der Geschwindigkeit ist, so muss von den Extremen des Drucks, wie diese bei den positiven und negativen Wellen eintreten, dasselbe gelten.

Es versteht sich nun von selbst, dass man die Geschwindigkeitsdifferenzen, welche während einer undulirenden Strömung statt finden, aus den Druckwerthen der Höhen- und Tiefenstände berechnen kann, wenn in der Formel

$$v = -\frac{b}{2a} + \sqrt{\frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2}{4} + \frac{w}{a}}$$

die Coëfficienten gegeben sind.

Ich werde in der Lehre vom Pulse auf die Frage zurückkommen, in wie weit eine derartige Berechnung der Geschwindigkeitsdifferenzen ausführbar scheint.

§ 65. In einem früheren Paragraphen wurden die Curven der Höhen- und Tiefenstände der Wellen aus Erfahrungen ab-

---

eintreten, dass die Ableitbarkeit beider aus einem Gesetze Manchem befremdlich erscheinen könnte. Man muss jedoch bedenken, dass das eine Gesetz durchaus nicht Einerleiheit der Erscheinungen beansprucht, sondern dass unter dem Einfluss desselben Gesetzes die verschiedensten Erfolge eintreten können, jenachdem die Anordnung der bedingenden Umstände eine verschiedene ist.

geleitet, wobei nicht verhehlt werden durfte, dass diese Ableitung wegen der Mängel des Apparates, mit welchem ich operirte, nur eine sehr ungefähre sein konnte. Es scheint jetzt Aussicht vorhanden, unsre Kenntniss von dem Gange dieser Curven auf theoretischem Wege auszubilden.

Wir haben in einem früheren Abschnitte gesehen, dass in einem Systeme verzweigter Röhren, auch wenn dieselben gleiche Durchmesser und im Allgemeinen gleiche Eigenschaften haben, der Seitendruck nicht gleichmässig abnimmt, sondern in den Abschnitten, durch welche das Wasser rascher strömt, stärker, als in denen, durch welche es langsamer fliesst. Auf den Zusammenhang dieser Erscheinungen mit den hydrodynamischen Gesetzen brauche ich nicht zurückzukommen, es genügt von der Thatsache Notiz zu nehmen. Gesetzt also, es liesse sich nachweisen, dass die Vermehrung der Stromschnelle, welche während des Stosses eintritt (§ 45), in den verschiedenen Abschnitten einer elastischen Röhre von verschiedenem Werthe, nämlich je näher der Einflussmündung, um so grösser wäre, so müsste auch der während des Stosses stattfindende Seitendruck im Verlaufe der Röhre ungleichmässig abnehmen, im Anfange derselben rascher und gegen das Ende langsamer. Es ist einleuchtend, dass unter solchen Umständen die Curve der Höhenstände eine krumme Linie bilden müsse, und aus entsprechenden Gründen würde auch der Verlauf der Tiefenstände kein geradliniger sein können, wenn die Verminderung der Stromschnelle, welche in den Pausen zwischen den Stössen eintritt, in den verschiedenen Regionen der elastischen Röhre von verschiedenem Werthe sein sollte.

Dies ist aber wirklich der Fall. Ich erwähnte schon oben der Erscheinung, welche eintritt, wenn man einen Schlauch, durch welchen stossweise Wasser fliesst, an der Seite ansticht. Bei jedem Stosse, welcher eine positive Welle erzeugt, spritzt das Wasser weiter, nach jedem Stosse, also in der Pause zwischen zwei Stössen, minder weit. Das Phänomen ist aber nicht in allen Abschnitten des Schlauches gleich auffällig, vielmehr ist der Un-

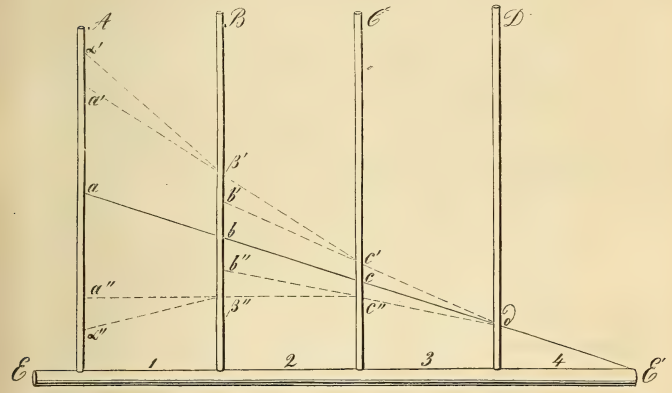
terschied in der Kraft des Spritzens um so geringfügiger, je näher man die seitliche Oeffnung am Ende des Schlauches anbringt. Da nun die Weite, in welcher das Wasser ausspritzt, mit seiner bewegenden Kraft ab- und zunimmt, so beweist die eben erwähnte Thatsache, dass die Geschwindigkeitsdifferenzen, welche in Gefolge des Stosses und der Pause im elastischen Schlauche eintreten, vom Anfang gegen das Ende desselben abnehmen.

Dieser Schluss ist nicht angreifbar und lässt sich durch eine leicht fassliche Betrachtung *a priori* rechtfertigen. Offenbar ist das Mass der Geschwindigkeit für eine Flüssigkeit, welche durch Röhren fliesst, durch die Masse gegeben, welche in einer bestimmten Zeit aus der Röhre abfliesst. Denken wir uns nun den elastischen Schlauch in viele kleine Abschnitte zerlegt, so fliesst während der Zeit des Stosses aus dem Ende des ersten Abschnittes das sämmtliche Wasser, welches der Stoss in die Röhre treibt, ausgenommen eine kleine Quantität, welche benutzt wird, um diesen Abschnitt auszudehnen. Aus dem zweiten Abschnitte fliesst die ganze Masse, welche der Röhre übergeben wurde, mit Ausnahme zweier kleiner Quantitäten, welche sowohl den ersten als auch den zweiten Abschnitt erweitern u. s. w., kurz aus jedem folgenden Abschnitte fliesst etwas weniger Wasser ab als aus dem nächst vorhergehenden, und folglich erleidet die Stromschnelle, inwiefern sie vom Stosse abhängt, vom Anfange des Rohres gegen das Ende hin eine stetige Verminderung.

Aber die Bewegung des Fluidums hängt im vorliegenden Falle nicht blos vom Stosse ab; das Wasser fliesst, auch wenn der Stoss vorüber ist, weil der ausgedehnte Schlauch vermöge seiner elastischen Kraft sich zusammenzieht und das von der durchrollenden Welle Zurückgelassene austreibt. Diese von der Elasticität abhängige Bewegung verhält sich genau umgekehrt wie die vom Stosse verursachte. Das Ende des ersten Röhrenabschnittes entleert nämlich die Wassermenge, durch welche er ausgedehnt wurde, das Ende des zweiten Abschnittes entleert die zwei Wassermengen, welche den ersten und den zweiten

Abschnitt erweiterten u. s. w., kurz jeder nächstfolgende Abschnitt entleert mehr, als der nächst vorhergehende, womit erwiesen ist, dass die Geschwindigkeit der Strömung im Zeitraume der Pause von der Einflussöffnung des Schlauches gegen die Ausflussöffnung progressiv zunimmt.

Nachdem dies festgestellt worden, lässt sich mit Präcision beweisen, dass die Curven der Höhen- und Tiefenstände in die Classe von Linien gehören, in welche wir sie, unseren freilich sehr unvollkommenen Beobachtungen zu Folge, schon einordneten (§ 55).



Es sei EE' eine elastische Röhre von gleichmässiger Weite, durch welche in der Richtung von E nach E' das Wasser strömt. Diese Röhre zerfalle in 4 gleich grosse Abschnitte, 1, 2, 3, 4, und am Anfange jedes dieser Abschnitte befinde sich ein Druck- oder Wellenmesser, *A*, *B*, *C*, *D*.

Gesetzt nun, das Wasser flösse mit gleichmässiger Geschwindigkeit durch die Röhre, so würde der Seitendruck von E nach E' abnehmen, wie die Entfernungen der Druckmesser von der Einflussöffnung, und man erhielte als Druckcurve eine gerade

Linie wie *a, b, c, d, e*. Es würde nämlich, von der Ausflussöffnung an gerechnet, der Druck in jedem weiter aufwärts liegenden Abschnitte der Röhre um dasselbe Quantum steigen müssen.

Was nun geschehen müsse, wenn das Fluidum, wie bei jeder Wellenbewegung, mit ungleichmässiger Geschwindigkeit fliesse, nämlich in jedem späteren Abschnitte langsamer als in jedem früheren, das wird sich am besten ergeben, wenn wir die Druckverhältnisse vom Ende der Röhre rückwärts verfolgen.

In dem vierten Abschnitte bestehen Widerstandsursachen, mit Bezug auf welche die Stromschnelle v einen Druck entwickelt, welcher das Wasser im Wellenmesser D bis d erhebt. Im Abschnitte 3 sind nun die Widerstandsursachen dieselben; wäre die Geschwindigkeit ebenfalls dieselbe geblieben, so müsste im Wellenmesser C das Wasser auf c steigen. Allein während des Stosses ist die Stromschnelle im dritten Abschnitte grösser als im vierten, aus v ist v' geworden und $v' > v$.

$$\text{Da nun } w = av^2 + bv$$
$$\text{und } w' = av'^2 + bv'$$

so ist w' grösser als w, das Wasser erhebt sich also im Wellenmesser C bis c'. Aus entsprechenden Gründen steigt das Wasser im Druckmesser B nicht bis b', sondern höher, bis β', und im Druckmesser A nicht blos bis a', sondern bis α', so dass $\alpha'\ \beta'\ c'\ d\ E'$ die Druckcurve der Höhenstände verzeichnet.

Betrachten wir jetzt die Druckcurve der Tiefenstände, so muss Folgendes eintreten. Im letzten Abschnitt hatte der Seitendruck das Wasser bis d erhoben; wäre im dritten Abschnitte die Geschwindigkeit dieselbe wie im vierten, so würde der Druck im Wellenmesser C auf c steigen. Indessen hat sich oben gezeigt, dass während der Pause die Stromschnelle von der Einflussmündung gegen die Ausflussmündung wächst, oder vom Röhrenende gegen den Röhrenanfang abnimmt; die Geschwindigkeit ist also im 3. Abschnitte geringer als im 4. Die Folge der verminderten Stromschnelle ist eine verminderte Druckdifferenz,

der Seitendruck wächst im 3. Abschnitte nicht um eben so viel als im 4., das Wasser erhebt sich nicht bis c, sondern nur bis c''. Weiter würde das Wasser im Wellenmesser B sich während der Pause bis b'' erheben, wenn die Stromschnelle im zweiten Abschnitte eben so gross als im dritten wäre, da sie aber geringer ist, so steigt es nur bis β'' u. s. w.

Wir erhalten also als Curve der Tiefenstände die Linie $\alpha'' \beta'' c'' d E'$, womit auf die einfachste Weise die Paradoxe erklärt ist, dass die Tiefenstände, obschon Seitendruckwerthe, doch abwärts von der Einflussöffnung erst steigen, bevor sie fallen.

Die beiden Curven der Höhen- und Tiefenstände nähern sich gegenseitig, bis sie sich am Ende des elastischen Schlauches berühren. Die Annäherung ist aber keine gleichmässige, sondern erfolgt im Anfange des elastischen Schlauches in schnellerer Progression als gegen dessen Ende.

§ 66. Da die Distanz der eben erörterten Curven (also $\alpha'\alpha''$, $\beta'\beta''$, $c'c''$ der vorstehenden Figur) der Wellengrösse entspricht, so giebt das im vorigen Paragraphen Entwickelte auch darüber Aufschluss, wie sich die Wellengrössen im Verlaufe des elastischen Schlauches verändern.

Es ist anschaulich gemacht worden, dass die Wellen im Verlaufe eines elastischen Schlauches immer kleiner werden müssen, und zwar im Anfange des Schlauches in schnellerer Progression als gegen Ende desselben. Zu diesem Resultate waren wir bereits auf dem Wege directer Beobachtungen gekommen (§ 55). Es ist ferner gezeigt worden, was schon aus anderen Gründen nicht bezweifelt werden konnte, dass eine Welle im Verlaufe eines elastischen Schlauches sich vor dem Ende desselben nie gänzlich verlieren kann.

Dies hindert natürlich nicht, dass die Welle weit vor dem Ende des Schlauches unmerklich werde, und es hat für die Pulslehre ein praktisches Interesse zu fragen, von welchen Umständen

das frühere oder spätere Unmerklichwerden der Wellen abhänge. *)

Im Allgemeinen ist einleuchtend, dass die Wellen um so früher verschwindend klein werden müssen, in je rascherer Progression die Curven der Höhen- und Tiefenstände sich nähern, wir werden also die Bedingungen zu untersuchen haben, welche die Annäherung beschleunigen.

Zunächst würden wir die Versuche zu berücksichtigen haben, welche ich über den Verlauf der Wellen in elastischen Röhren angestellt habe. Die § 49 mitgetheilten Tabellen enthalten die Angaben der Wellengrössen für bestimmte Punkte eines und desselben Schlauches. Gesetzt, die Welle im dritten Wellenmesser fände sich in einem Falle $\frac{1}{2}$ so gross als die im ersten Wellenmesser, in einem zweiten Falle dagegen und unter veränderten Umständen nur $\frac{1}{4}$ so gross, so ist einleuchtend, dass die Umstände des zweiten Falles das scheinbare Verschwinden der Wellen beschleunigen.

Ich benutze also die früheren Beobachtungen in der Weise, dass ich die Wellen des ersten Wellenmessers zu denen des dritten, demnach weiter abwärts befindlichen, in Verhältniss bringe.**) Um die Uebersicht zu erleichtern, wird die Wellengrösse des ersten Wellenmessers als Einheit betrachtet, so dass die Wellengrösse im dritten als Bruchtheil der ersten betrachtet wird. Es bedarf der Bemerkung kaum, dass jede abnehmende Grösse des Decimalbruches auf eine beschleunigte Annäherung

*) Die praktischen Aerzte wissen, dass der Puls bisweilen auch in den kleinen Arterien fühlbar wird, während er in andern Fällen selbst in den grösseren Aesten verschwindet und sich in die Hauptstämme so zu sagen zurückzieht. Die Pulsgrenze ist also eine veränderliche, und es wird sich hier bereits, obschon nur in grösster Allgemeinheit, um die Bedingungen handeln, von welchen diese Veränderung abhängt.

**) Ich habe den dritten Wellenmesser bei diesem Vergleiche dem vierten vorgezogen, weil in letzterem die Wellengrösse durch eine Art von Brandung ungehörig und ungleichmässig gesteigert ist.

der positiven und negativen Druckcurve oder auf das frühere Unmerklichwerden der Wellen hinweist.

Die nachstehende Tabelle berücksichtigt drei Umstände, welche das frühere oder spätere Verschwinden der merkbaren Wellen influenziren, d. h. die Fallhöhe, die Pulsfrequenz und die Grösse der Ausflussöffnung der Röhre, von welcher der Grad der Widerstände abhängt. Die Tabelle soll zeigen, welche Wirkung die Veränderung einer dieser Bedingungen *caeteris paribus* hervorbringt; der Plan ihrer Anordnung wird keiner Erläuterung bedürfen.

Tabelle

über die Abnahme der Wellengrösse in einem Darm bei einer Fallhöhe von

250 Millimeter			400 Millimeter			550 Millimeter			
Durchmesser der Ausflussöffnung	Zahl der Pulse in 1 Minute		Durchmesser der Ausflussöffnung	Zahl der Pulse in 1 Minute		Durchmesser der Ausflussöffnung	Zahl der Pulse in 1 Minute		
	31	41		31	41		31	41	49
2,6 M.	0,31	0,50	2,6 M.	0,39	0,31	2,6 M.	0,49	0,33	?
3,5 »	0,47	0,60	3,5 »	0,43	0,39	3,5 »	0,52	0,34	0,31
5,1 »	0,69	0,68	5,1 »	0,56	0,56	5,1 »	0,56	0,47	0,42

In vorstehender Tabelle ist nur der Einfluss der Widerstände klar ausgeprägt. Jemehr die Ausflussöffnung vergrössert und folglich der Widerstand der elastischen Röhre verkleinert wurde, um so mehr näherte sich die Wellengrösse im dritten Wellenmesser der Einheit. Dies heisst mit anderen Worten, dass mit Abnahme der in elastischen Röhren vorkommenden Hemmnisse die Welle um so weiter abwärts von ihrem Entstehungspunkte noch merkbar bleibt.

Minder klar ist der Einfluss der Pulsfrequenz. Bei stärkeren Fallhöhen hat Beschleunigung des Pulses zwar regelmässig eine beschleunigte Abnahme der Wellengrösse zur Folge, aber in den Versuchen mit einer geringen Fallhöhe von 250 Millimeter erleidet

diese Regel ein Paar so auffallende Ausnahmen, dass eine Beseitigung derselben durch die Annahme von Beobachtungsfehlern kaum möglich scheint.

Ueber den Einfluss der Fallhöhe lässt sich aus der Tabelle nichts ableiten, indem die Zahlen jeden regelmässigen Fortgang vermissen lassen. Vor der Hand sind also die empirischen Unterlagen für die Beantwortung der aufgeworfenen Frage äusserst dürftig; indess scheint es möglich, durch Benutzung allgemeiner Prinzipien noch Manches aufzuklären.

§ 67. Die Fortpflanzung der Wellen muss in stark gespannten Schläuchen in anderer Weise vor sich gehen, als in schwach gespannten. Unstreitig findet in Schläuchen, welche eine Flüssigkeit wellenförmig wegtreiben, etwas Aehnliches statt, wie in angespannten Saiten, von denen bekannt ist, dass sie bei starker Spannung schnellere Schwingungen, aber kleinere Excursionen machen, als bei schwacher Spannung.

Unterscheiden wir, wie oben, zwischen einem Momente des Stosses und einem Momente der Contraction, so wird, bei starker Spannung des Schlauches, die durch den Stoss eingetriebene Wassermasse einerseits weiter vordringen, andrerseits aber, eben weil sie weiter vordringt und folglich sich durch eine grössere Anzahl von Röhrenabschnitten verbreitet, eine geringere Expansion vermitteln. Letzteres ist schon deshalb unzweifelhaft, weil der Schlauch mit zunehmender Spannung einer starren Röhre immer ähnlicher wird, in welcher eine Expansion gar nicht eintreten würde.

Wenn nun sämmtliche Abschnitte des elastischen Schlauches, in welchem die durch den Stoss eingetriebene Wellenmasse untergebracht wird, sich in geringerem Masse expandiren, so lässt auch das durch den Stoss bewegte Fluidum in jedem Röhrenabschnitte weniger Masse zurück, d. h. der Abfluss erfährt in der Reihenfolge der Röhrenabschnitte geringere Subtractionen, und folglich vermindert sich auch die vom Stosse abhängige Schnelligkeit in langsamerer Progression; das Umgekehrte findet

im Momente der Contraction statt. Wir sahen oben, dass der erste Abschnitt der Röhre während der Contraction nur seinen Inhalt, der zweite Abschnitt dagegen sowohl seinen Inhalt, als auch den des ersten zu entleeren habe, und dass hierdurch die Stromschnelle von der Einflussmündung gegen die Ausflussmündung progressiv zunehme. Ist nun in stark gespannten Schläuchen die in jedem Röhrensegmente enthaltene überschüssige Masse geringer, so erfolgt die Zunahme der Stromschnelle während der Contraction in langsamer Progression.

Nach dem, was in § 65 von dem Einflusse der Geschwindigkeit auf die Druckcurven und von dem Zusammenhange dieser mit der Veränderung der Wellengrösse gesagt worden ist, darf angenommen werden, dass die Verkleinerung, welche die Wellen in ihrem Verlaufe erfahren, in stärker gespannten Schläuchen langsamer erfolge. Hiermit ist freilich nicht gesagt, dass nun die Wellen auch in grösserer Entfernung von der Einflussöffnung sinnlich wahrnehmbar bleiben müssten, denn da in stärker gespannten Schläuchen die Wellen vom Anfange herein kleiner sind, so könnten sie trotz der langsameren Abnahme ihrer Höhe gleichwohl früher schon der Wahrnehmung entzogen werden. Wollte man also mit Pulsgrenze diejenige Stelle eines elastischen Schlauches bezeichnen, wo die Pulsation sich der sinnlichen Wahrnehmung entzieht, so lässt sich annehmen, dass die Entfernung derselben von der Eingangsmündung mit zunehmender Spannung anfangs wachse und dann wieder sinke. *)

Dem Gesagten zu Folge stände zu erwarten, dass alle Umstände, welche die Spannung des Schlauches steigern, wie Vermehrung des Widerstandes und der stossenden Kraft, Beschleunigung der Stösse, bei unveränderter Quantität des mit jedem Stosse in die Röhre getriebenen Fluidums, u. s. f. die Abnahme

*) Die Pulsgrenze in dem eben erklärten Sinne hat natürlich kein physikalisches Interesse, da die sinnliche Wahrnehmbarkeit aller exacten Bestimmung entbehrt, aber für die pathologische Pulslehre ist sie nicht ganz gleichgültig.

der Wellengrösse verlangsame. Den gleichen Erfolg müsste eine strengere Elasticität der Röhre selbst haben. Meine Versuche sind nicht ausreichend zu beurtheilen, ob die Erfahrung diesen Erwartungen entspreche.

§ 68. Wir haben im Vorhergehenden die stossweisse Bewegung des Wassers durch elastische Schläuche als eine einfache Wellenbewegung betrachtet, was für die Darstellung Bequemlichkeit hatte, aber streng genommen nicht richtig ist. Eine exactere Darstellung muss zwischen 2 Arten von Wellen unterscheiden, welche sich in den verschiedensten Verhältnissen übereinander legen und Erscheinungen bedingen, welche die Physik mit Interferenz der Wellen bezeichnet.

Der Stoss, welcher die Flüssigkeit in Bewegung setzt, wird von Molekül zu Molekül fortgepflanzt, und zwar in derselben Weise wie Schallwellen, also mit einer Geschwindigkeit, welche durch die Dichtigkeit des flüssigen Mediums bedingt ist.

Abgesehen von diesen Wellen, entstehen noch andere in den Wandungen des elastischen Schlauches, welche zwar demselben Stosse wie die erst erwähnten ihr Dasein verdanken, aber in Bezug auf die Geschwindigkeit ihres Verlaufes nicht von der Dichtigkeit des Fluidums, sondern von der Spannung des Schlauches abhängen. Diese Wellen sind vollkommen analog denen, welche ein gespanntes Seil oder eine gespannte Saite zeigt, wenn das eine Ende derselben erschüttert wird. Je stärker die Spannung, um so rascher das Fortrollen der Welle von dem erschütterten Ende gegen das nicht erschütterte. Man könnte allenfalls einen elastischen Schlauch als einen Ueberzug sich berührender Saiten über einen idealen Cylinder betrachten, wodurch die Uebereinstimmung zwischen den Schwingungen beider eine gewisse Anschaulichkeit gewinnt.

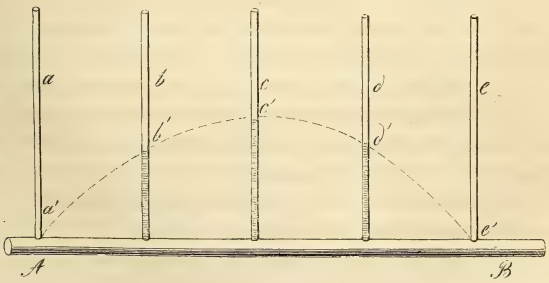
Die Wellen der Flüssigkeit werden rascher fortgepflanzt als die Wellen des Schlauches, daher werden diese hinter jenen zurückbleiben, und es kann vorkommen, dass die Welle der Flüssigkeit eine Welle des Schlauches nicht nur einholt, sondern

überholt; ich meine nämlich eine Schlauchwelle, welche einem früher erfolgten Stosse ihr Dasein verdankt.

Wenn man nun fragt, welchen Erfolg das Ineinandergreifen der beiden Wellensysteme habe, so kann man sich leicht täuschen, wenn man die Erfahrungen über die Superposition der Wellen zu voreilig auf den vorliegenden Fall überträgt. Wenn mehrere Wellensysteme sich auf einer Flüssigkeit bewegen, so entsteht durch das Zusammenfallen zweier positiver Wellen ein höherer Berg, durch das Zusammenfallen zweier negativer Wellen ein tieferes Thal, und endlich durch Zusammenfallen einer positiven und negativen Welle eine mehr oder weniger vollständige Herstellung des Niveaus. In unserem Falle wird aber die positive Welle des Schlauches keine Steigerung, sondern im Gegentheil eine Verkleinerung der Bergwelle der Flüssigkeit veranlassen, eine Behauptung, welche ich sogleich rechtfertigen werde.

Man abstrahire zunächst von den minder wichtigen Wellen des Schlauches gänzlich und stelle sich der Bequemlichkeit wegen vor, die Wellen der Flüssigkeit entstünden in einer starren Röhre.

In beistehender Figur bedeute *A B* die starre Röhre,

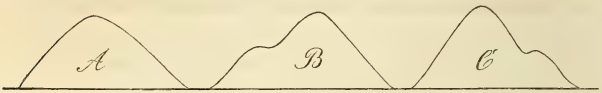


bei *a b c d e* seien Wellenmesser aufgesetzt, und in diesen steige das Wasser in Folge des Stosses im Wellenmesser *a* bis *a'*, in *b*

bis b' u. s. w. Unter diesen Voraussetzungen ist die punktirte Linie $a'\ b'\ c'\ d'\ e'$ die Curve der Höhenstände, durch welche die Form der positiven Welle gegeben ist.

Es leuchtet sogleich ein, dass es bei dieser Form nicht bleiben könne, wenn man die starre Röhre in eine elastische verwandelt; wir wollen die Formveränderungen, welche in Folge der Elasticität auftreten, als Correcturen der eben beschriebenen Normalform einführen.

Gesetzt, die Röhre erweiterte sich zwischen a und e, so würde das durchströmende Fluidum eine Verminderung seiner Geschwindigkeit erfahren, und da die Druckhöhen Functionen der Geschwindigkeit sind, müssten alle Höhenstände, und mit ihnen die ganze Bergwelle, eine Verminderung erfahren.*) Gesetzt aber, die Erweiterung der Röhre erfolgte nicht in der Ausdehnung zwischen a und e, sondern in einer kleineren Strecke, etwa in der Gegend von b oder von d, so würde der Druck an den ebengenannten Punkten eine Verminderung, und folglich die Druckcurve bei b' oder bei d' eine Einbiegung erfahren. Statt einer Wellenform wie bei A erhielten wir eine Form wie bei B oder bei C.



§ 69. Um die Interferenz der ebenerwähnten Wellensysteme genauer zu beobachten, bedarf es eines so feinen Apparates, wie ihn Ludwig zur Darstellung der Pulswellen construirt hat. Ich werde dieses ingeniöse Instrument (welches der Kürze wegen Kymographion heissen mag), in einem späteren Abschnitte ausführlich beschreiben und jetzt nur erwähnen, was zum Verständniss der nachfolgenden Beobachtungen unerlässlich nöthig ist.

*) Man könnte auch sagen, die Expansion der Röhre wirke durch Saugen und negire hiermit einen Theil des Druckes, welchen die gestossene Flüssigkeit ausübe.

In einem Druckmesser (§ 3) befindet sich ein Stäbchen, welches auf der Flüssigkeit schwimmt, und folglich mit der positiven Welle steigt und mit der negativen sinkt. An dem Ende dieses Stäbchens oder Schwimmers, welches frei aus der Glasröhre des Druckmessers hervorragt, befindet sich eine Feder, und diese schreibt auf einem Papierbogen, welcher durch einen geeigneten Mechanismus mit gleichmässiger Geschwindigkeit unter der Feder weggezogen wird. Natürlich werden nun Wellenlinien gezeichnet, welche der Evolution der im Druckmesser erregten Wellen absolut entsprechen.

Wenn die Feder des Schwimmers schreibt, während keine Wellen erregt werden, entsteht statt der undulirten Linie eine gerade, und wenn sie schreibt, während das Wasser im elastischen Schlauche ruht, so entsteht eine gerade Linie, ohne irgend eine Erhebung des Schwimmers, also bei Nulldruck. Es ist zweckmässig, die Versuche so einzurichten, dass unter jeder Curve der Wellenbewegung eine gerade Linie bei Nulldruck gebildet werde. Jede Normale, welche von einem beliebigen Punkte der Curve auf diese gerade Linie gefällt wird, ist eine Ordinate, welche den Druck misst, bei welchem die Wellen sich bilden, und die Entfernung der Ordinaten unter einander entspricht der Geschwindigkeit, mit welcher das Papier unter der Feder hingleitet, welche den respectiven Höhen- oder Tiefenstand der Welle anschreibt. Kurz die Gerade unter der Curve ist die Abscissenlinie, welche die Zeit misst.

An einem Gummischlauche von ungefähr 3 Meter Länge und 8 Millimeter Durchmesser wurden 2 Ludwigsche Wellenmesser angebracht, der erste 350 Millimeter, der zweite 850 Millimeter unterhalb der Einflussmündung. Das Wasser wurde dem Schlauche durch denselben Apparat stossweise zugeführt, welchen ich oben schon beschrieben habe (§ 46). Nur wurde der Hahn nicht durch den Pendel regiert, sondern aus freier Hand. Ich band eine Taschenuhr ans Ohr und regulirte das Oeffnen und Schliessen des Hahnes nach den Uhrschlägen, womit eine

hinreichende Genauigkeit erreichbar war, während es in meinem Belieben stand, das Verhältniss der Systole zur Diastole auf das Mannigfaltigste zu verändern.*)

Um weitläufige Beschreibungen zu vermeiden, werde ich Tab. IV die mit Hülfe des Kymographion gezeichneten Curven, inwiefern sie ein theoretisches Interesse haben, unmittelbar vorlegen. Zum Verständniss derselben ist Folgendes im Voraus zu bemerken. In allen Figuren ist AB die Abscisse, ab die Curve des ersten Kymatographion und $\alpha\beta$ die Curve des zweiten. Immer bezeichnen a und α, desgleichen b und β synchronische Punkte der beiden Curven, woraus sich von selbst ergiebt, dass alle zwischen a und b einerseits und α und β andrerseits gelegenen correspondirenden Punkte ebenfalls gleichzeitige sind. Die beiden Curven zeigen also, was in einem oberen und in einem unteren Theile des Schlauches gleichzeitig vorgeht, und gewähren demnach eine Anschauung einer und derselben Welle in verschiedenen Phasen ihrer Entwickelung. Hierbei ist in Erinnerung zu bringen, was schon oben bemerkt wurde, dass die Wellengrösse von zufälligen Verhältnissen im Baue der Wellenmesser und folglich auch des Kymographion abhänge. Die Veränderung, welche eine Welle in den verschiedenen Stadien ihrer Entwickelung bezüglich der Grösse erfahre, ist demnach aus den Curven, die ich mittheile, nicht ersichtlich.

Schliesslich bemerke ich, dass man die Ordinaten meiner Curven zu verdoppeln und mit dem spezifischen Gewichte des Quecksilbers zu multipliciren hat, um die wahren Druckwerthe zu erhalten. Der Grund hiervon liegt im Baue des Kymographion, wovon unten das Weitere.

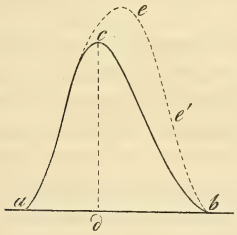
§ 70. Im Folgenden werde ich die Tab. IV Fig. 1—6 abgebildeten Curven erläutern.

Fig. 1. Die Fallhöhe des Wassers, welches dem Schlauche

*) Nach Analogie der Vorgänge beim Kreislaufe bezeichne ich das Oeffnen des Hahnes, als die Ursache des Stosses, mit dem Worte Systole und das Schliessen desselben mit dem Worte Diastole.

stossweise zugeführt wurde, betrug 1,312 Meter. Die jedesmalige Dauer der Oeffnung des Hahnes (Systole) betrug 0,4″, die Dauer des Verschlusses (Diastole) desgleichen 0,4″.

Bemerkenswerth ist eine Differenz in der Bildung der Curven *ab* und *αβ*, indem erstere bei jeder Welle steiler aufsteigt und minder steil abfällt, als letztere*). Man hätte erwarten sollen, dass eine vom Gipfel der Welle auf die Abscisse *ab* (siehe die beistehende Figur) gefällte Normale die Welle halbire. Es ent-



spricht nämlich das Aufsteigen der Curve von *a* nach *c* offenbar der Systole, und das Herabsinken derselben von *c* nach *b* der Diastole. Da nun Systole und Diastole von gleicher Dauer waren, so sollte auch, die Abscisse der Systole *ad*, gleich sein der Abscisse der Diastole, *db*, während letztere ohne Ausnahme grösser ist, als jene.

Die Thatsache beweist, dass der Gipfel der Welle nicht nothwendig mit dem Maximum des Druckes zusammenfällt, welcher vom Stosse ausgeht. Dies würde, dünkt mich, ganz unbegreiflich sein, wenn sich die Welle in Folge einer einzigen Ursache eben als einfache Welle entwickelt hätte. Ich bin daher geneigt zu glauben, dass schon der vorliegende Fall die Gegenwart eines doppelten Systems von Wellen beweist, und nehme an, dass die

*) Zum Verständnias dieser Angabe muss ich bemerken, dass meine Tafeln Wellen darstellen, welche von rechts nach links rollen.

Welle des Stosses die Form gehabt haben würde, welche die punktirte Linie ee' andeutet, wenn nicht die Ausdehnung des Schlauches einen Theil derselben auf der absteigenden Seite negirt hätte.

Jedenfalls berechtigt uns die vorliegende Curve (welche beiläufig bemerkt nur ein kleines Bruchstück einer sehr grossen von vollkommen gleicher Bildung ist) zu dem nicht unwichtigen Schlusse, dass die Abscissen der Systole und Diastole kein exactes Zeitmass für die Dauer der Systole und Diastole abgeben.

Fig. 2. In dem Versuche, welcher diese Curve ergab, war die Fallhöhe 1,150 Meter, die Dauer der Systole betrug 0,4″, die Dauer der Diastole 0,8″. Jeder absteigende Abschnitt der Curve zeigt den Anfang einer neuen Erhebung, man kann sagen, jede grössere Welle ist die Trägerin einer kleinen. Diese kleinen Wellen sind durch keine besonderen Stösse vermittelt, vielmehr ist jede grosse Welle mit Einschluss der kleinen, welche sie trägt, die Folge eines einzigen Stosses. Die doppelte Elevation scheint dadurch entstanden, dass sich auf dem Rücken eines grossen Wellenberges ein kleines Wellenthal bildete, und die Bildung dieses Thales beziehe ich auf die Verminderung des Seitendruckes in Folge der Erweiterung des Schlauches.

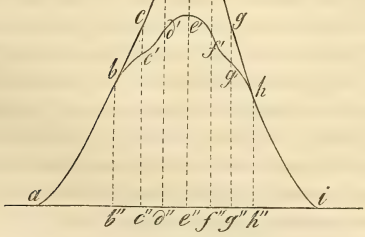
Den Physiologen kann die Beziehung des eben erörterten Falles zum *pulsus dicrotus* nicht entgangen sein, ich werde später Gelegenheit haben, hierauf zurückzukommen.

Fig. 3. Die Fallhöhe betrug 1,312 Meter, die Dauer der Systole = 0,4″, die Dauer der Diastole = 0,8″. — Auch im vorliegenden Falle zeigen sich Doppelwellen in Folge einfacher Stösse. Sehr merkwürdig ist aber die Verschiedenheit der Wellenformation in den beiden isochronen Curven. In der Curve *ab*, also in derjenigen, welche die Wellenbildung im Anfange des Gummischlauches darstellt, bildet die kleine Welle einen Vorschlag der grossen; in der Curve $\alpha\beta$, also weiter abwärts im Schlauche, ist das Verhältniss das umgekehrte. Berücksichtigt

man, dass die Welle des Schlauches sich langsamer bewegt als die der Flüssigkeit, so kann diese Differenz der Form nicht auffallen. In jedem Abschnitte des Schlauches fallen andere Abschnitte der beiden Wellen zusammen, und folglich muss auch in jedem Abschnitte eine andere Wellenform als Resultante hervortreten.

Fig. 4. Die Fallhöhe = 1,312 Meter, die Systole = 0,4″, die Diastole = 0,8″. Der Fall unterscheidet sich von dem vorhergehenden nur dadurch, dass am Ende des Gummischlauches eine kleinere Ausflussöffnung angebracht war. Der Durchmesser derselben betrug dies Mal 3,5 Millimeter, im vorigen Falle 5 Millimeter. Man wird annehmen dürfen, dass in Folge dieser Veränderung eine Vermehrung der Widerstände und also eine grössere Spannung des Schlauches entstehen musste. Das sehr Merkwürdige dieser Beobachtung liegt in dem Umstande, dass jede grosse Welle der Curve $a\beta$ zwei kleinere Wellen trägt, die eine auf der Seite des Aufsteigens, die andere auf der Seite des Absteigens. Auf diese Weise zeigt jede nur durch einen Stoss producirte Welle eine Andeutung von drei Spitzen.

Auch diese Form ist nach den eben erörterten Prinzipien erklärbar. Es sei $a\ b\ c\ d\ e\ f\ g\ h\ i$ die Curve der Flüssigkeitswelle und bb'', cc'', ... hh'' seien die Ordinaten derselben. Diese Welle



erfährt eine Correctur durch die Welle des Schlauches, deren Ordinaten in der Figur mit *c c'*, *d d'*, *e e'*, *f f'*, *g g'* bezeichnet sind. Da die Schlauchwelle den Druck mindert, so sind ihre Ordinaten von denen der Flüssigkeitswelle abzuziehen, und es bleibt daher als Rest der Curve *a b c' d' e' f' g' h i*, womit die unregelmässige Form der Welle mit 3 Elevationen gegeben ist.

Fig. 5. Die Fallhöhe = 950 Millimeter, Systole = 0,93″, Diastole = 0,93″. — Das Interesse liegt hier in der Formation der Curve *ab*, nämlich in dem Parallelismus ansehnlicher Abschnitte derselben mit der Abscisse. Eine Horizontale kann nach der Einrichtung des Kymographion nur entstehen, wenn der Schwimmer, an dessen Ende die schreibende Feder befestigt ist, sich nicht bewegt. Nun ist aber die Bewegung des Schwimmers von der Bewegung der Welle abhängig, und folglich beweist die Horizontale, welche ein aufsteigendes und ein absteigendes Segment der Curve verbindet, eine vollständige Hemmung der Wellenbewegung, und zwar mitten im Gange ihrer Entwickelung. Eine solche Hemmung ist nur möglich, wo zwei Wellensysteme sich kreuzen. Ich erkläre mir die abnorme Gestalt der Curve dadurch, dass die Expansion des Schlauches gerade den Theil des Druckes zerstört hat, welcher das Entstehen der Wellengipfel bedingte.

Fig. 6. Fallhöhe = 1,080 Meter, Systole = 0,8″, Diastole = 0,8″. Ich nehme diese Curve nur deshalb mit auf, um zu zeigen, wie eine kleine Veränderung der Bedingung eine sehr merkliche Veränderung in der Formation veranlasst. Es sind nämlich die Bedingungen, unter welchen dies Mal die Wellen sich bilden, fast genau dieselben als im vorigen Falle, nur ist der Rhythmus des Pulses ein wenig schneller und die Fallhöhe ein wenig grösser. Allerdings war auch die Verbindungsröhre zwischen dem Schlauche und dem Kymographion weiter, indess scheint dieser Umstand nur die Grösse, nicht aber die Form der Wellen zu influenziren.

In vielen Fällen werden die Curven so regelmässig gebildet, dass von einer Kreuzung der Wellen auch nicht die geringste Spur zu finden ist. Fig. 1 bildet den Uebergang zu diesen Formen, indem die Curve bei jeder Systole glatt emporsteigt und bei jeder Diastole eben so glatt herabsinkt. Eine Andeutung von Superposition der Welle liegt nur in dem Umstande, dass die Abscisse der Systole kleiner ist als die Abscisse der Diastole, wie oben gezeigt wurde. Indess kommen Wellenformen vor, wo auch diese Andeutung fehlt.

Für die Theorie dürften gerade diese regelmässigen Formen die schwierigen sein. Bei gleichzeitigem Auftreten zweier Wellensysteme kann ein gleichmässiges Steigen und Sinken der Curve nur da vorkommen, wo beide in einander greifende Wellen in ihrer ganzen Ausdehnung sich decken. Da nun die Wellen der Flüssigkeit sich schneller bewegen als die des Schlauches, so würde eine absolute Deckung überhaupt nie zu erwarten stehen, und eine approximative nur im Anfange des Schlauches. Ich bekenne, dass ich diese Schwierigkeit nicht vollständig zu lösen weiss.

Zu bemerken ist, dass die Strecke, in welcher die beiden Wellen approximativ zusammenfallen, unter Umständen eine sehr lange sein könnte, dann nämlich, wenn die Geschwindigkeit ihrer Fortpflanzung nur wenig verschieden wäre. Es vermindert sich aber die Differenz der Geschwindigkeit mit Zunahme der Kraft der Elasticität und der Stärke der Spannung des Schlauches.

Ferner liegt es in der Natur der Dinge, dass das Kymographion die geringeren Wirkungen der Interferenz bis auf einen gewissen Grad verbirgt.

Die im Schlauche stattfindenden Wellen werden im Kymographion verkleinert, was auf die *vis inertiae* hinausläuft und nur möglich ist, indem die Druckdifferenzen der Höhen- und Tiefenstände sich theilweise ausgleichen. Natürlich tritt nun auch ein Streben nach Ausgleichung derjenigen Differenzen ein, von welchen die Einbiegungen und Ausbiegungen der Curve in Folge

der Wellenbewegung abhängen. Hierzu kommt noch, dass der Schwimmer, welcher die Curve aufschreibt, keine absolute Beweglichkeit hat und folglich geringere Excursionen macht, als die Welle, welche ihn trägt. Unter solchen Umständen geht die feinere Figuration der Wellen verloren, und die Curven werden regelmässig, auch wo dem Causalverhältniss zu Folge eine gewisse Unregelmässigkeit stattfinden müsste.

Meine Beobachtungen zeigen ohne Ausnahme, dass die Zeichen der Interferenz um so vollständiger verschwinden, je rascher der Puls ist. Bei 75 Pulsen in einer Minute und einer derartigen Regulirung des Hahnes, dass Systole = Diastole (also = 0,4″) war, zeigte ein solcher Abschnitt der Curve, welcher einem Pulse entsprach, nie Welle auf Welle, auch waren häufig genug die Abscissen der Systole und der Diastole sich annäherungsweise gleich.

Aber nichts scheint die Phänomene der Interferenz mehr zu begünstigen, als ein Missverhältniss zwischen der Dauer der Systole und Diastole. Liess ich die Diastole länger dauern als die Systole, so war zum Mindesten die Abscisse der ersten ansehnlich grösser als die der letzteren, in den meisten Fällen aber zeigten sich Wellen auf Wellen oder diejenigen Phänomene, welche an den *pulsus dicrotus* erinnern. Unter den mitgetheilten Curven wird dies durch Fig. 2—5 erläutert.

Es würde am Schlusse dieses Abschnittes der Ort sein, mich über *H. Frey's* Versuch einer Theorie der Wellenbewegung des Blutes in den Arterien (Müllers Archiv 1845) auszusprechen, aber ich bekenne, dass mir diese Arbeit in zu vielen Beziehungen unklar geblieben ist, als dass ich ein Urtheil wagen dürfte. Nur möchte ich glauben, dass mein Vorgänger in der Fragstellung nicht glücklich gewesen, indem er die verwickelsten Verhältnisse in Untersuchung zieht, während die einfachen Grundphänomene noch keineswegs ergründet sind.

Cap. V.

Vom Blutdrucke.

§ 71. Das Blut, welches durch die Adern strömt, drückt gegen die Gefässwandungen, wie schon das Spritzen angestochener Arterien ausweist. Für die Physik der Blutbewegung ist es wichtig, die Grösse dieses Drucks genau zu ermitteln.

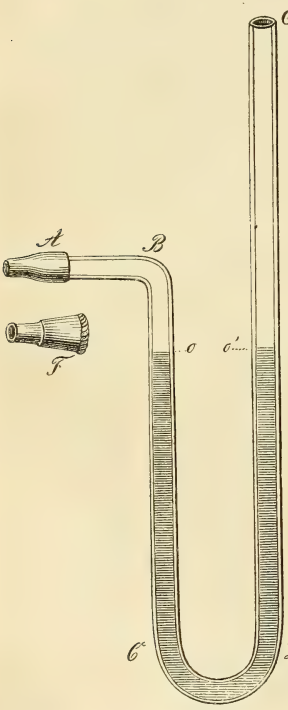
Der Erste, welcher den glücklichen Gedanken hatte, den Blutdruck durch exacte Messungen zu bestimmen, war der Engländer *Hales*.*) Er liess an eine lange Glasröhre ein rechtwinklig gebogenes Messingröhrchen ankitten und befestigte mit Hülfe einer Ligatur dieses Mundstück an eine geöffnete Schlagader. Das Blut stieg nun in der Glasröhre empor und erhob sich bei Pferden bis zu der beträchtlichen Höhe von 8 bis nahezu 10 Fuss.

Das Experiment von Hales gehört vielleicht zu den wichtigsten, welche im Gebiete der organischen Physik je gemacht worden, gleichwohl ist es nicht frei von manchen Mängeln. Erstens gerinnt das Blut in der Röhre sehr bald und erlaubt daher keine anhaltende Beobachtung. Ferner muss die Röhre eine Länge von ungefähr 10 Fuss haben, was an sich sehr unbequem ist, überdies aber den wesentlichen Nachtheil hat, dass zur Füllung derselben ein nicht unbeträchtliches Quantum von Blut verbraucht wird. Dieses Quantum wird dem Thiere entzogen, die Gefässhöhle verliert also einen Theil ihrer Spannung, und der Druck, welcher im Experimente gefunden werden soll, wird durch das Experiment selbst vermindert. Bei grossen Thieren wird nun zwar diese Fehlerquelle sich wenig geltend machen, bei kleinen Thieren dagegen kann die von Hales benutzte Methode keine sichern Resultate liefern. Der sehr geringe Blutdruck, den

*) Statik des Geblütes von *Stephan Hales*, mit Anmerkungen von *Sauvage*. Halle 1748.

Hales bei kleinen Hunden beobachtete, hängt unstreitig von diesen Mängeln des Apparates ab.

§ 72. *Poiseuille* erwarb sich ein grosses Verdienst, indem er die von Hales entdeckte Methode verbesserte. Er bediente sich zu seinen Untersuchungen eines Instrumentes, welches so eingerichtet war, dass das Blut eine Quecksilbersäule zu heben hatte. Indem nun Quecksilber ungefähr 13,5 Mal schwerer ist als Blut, so musste auch die Druckhöhe gegen 13,5 Mal geringer ausfallen, als in den Versuchen von Hales. Das Thier brauchte also nur sehr wenig Blut abzugeben, um die Erreichung dieser Druckhöhe möglich zu machen, und die Glasröhre durfte eine sehr geringe Länge haben.*)



Der Hämodynamometer, unter welchem Namen Poiseuille sein Instrument bekannt gemacht hat, besteht aus einer gebogenen Glasröhre, *ABCDE*, welche, wie Figur zeigt, einen horizontalen Schenkel, *A B*, einen vertical absteigenden, *B C*, und einen vertical aufsteigenden, *DE*, besitzt. Der hufeisenförmig gebogene Theil

*) *Recherches sur la force du coeur aortique par J. L. M. Poisseuille. Magendie Journal de Phys. T. IX. pag.* 341.

des Instrumentes $oCDo'$ wird mit Quecksilber gefüllt und der noch übrige Theil der Glasröhre, gegen die Mündung A hin, mit einer Auflösung von *natron subcarbonicum*. Durch Einwirkung der letzteren wird das von A her in die Röhre dringende Blut verhindert zu gerinnen. Zum Messen des Drucks dienen zwei Scalen, die eine am aufsteigenden und die andere am absteigenden Schenkel, wie die Figur erläutert. Die Nullpunkte beider Scalen fallen zusammen, und die Masszahlen verlaufen nach den entgegengesetzten Seiten.

Um die Einführung des Instrumentes in das betreffende Blutgefäss zu erleichtern, liess Poiseuille den horizontalen Ast desselben bei A in ein metallenes, mit einer Schraube versehenes Mundstück auslaufen, an welches eine Kanüle F angeschraubt werden konnte. Diese Kanüle wurde vor dem Versuche in ein Blutgefäss eingebunden und dann erst am Mundstücke des Hämodynamometers befestigt.*) Endlich war an letzterem noch ein Bleiloth angebracht, um während des Versuches den absteigenden und aufsteigenden Schenkel der Röhre in verticaler Lage zu erhalten.

Sehr zweckmässig ist, die zerbrechliche Glasröhre auf einem schmalen Brettchen zu befestigen und den horizontalen Ast, AB, welcher bei den oft unvermeidlichen Bewegungen des Thieres leicht wegbricht, durch eine Kautschukröhre zu ersetzen. Am Ende dieser Röhre ist in meinen Instrumenten ein Hahn angebracht, welcher nach Füllung der Glasröhre mit Quecksilber und Natronlösung vorläufig geschlossen wird, bis alle Vorbereitungen beendet und namentlich Hämodynamometer und Kanüle in gehörige Verbindung gebracht sind. Mit Hülfe eines sol-

*) Dabei muss das Blutgefäss wiederholt um seine Axe gedreht und unter Umständen verschlossen werden, daher die Einrichtung mit einer Schraube verwerflich ist. Ist das metallene Mundstück des Hämodynamometers konisch zugespitzt und in die anzusteckende Kanüle gut eingeschliffen, so erhält man eine luftdichte und hinreichend feste Verbindung auch ohne Schraube.

chen Hahns ist am leichtesten zu vermeiden, dass ein Theil der Natronlösung schon vor dem Versuche aus dem horizontalen Schenkel abfliesse und Luft statt ihrer in die Röhre dringe.

Da der Blutdruck bisweilen dem Druck einer Quecksilbersäule von 320 Millimeter Höhe gleichkommt, so muss die Glasröhre eine Länge haben, welche dem Quecksilber eine Erhebung von mindestens 160 Millimeter über das Niveau gestattet. Die Weite der Röhre hat zwar auf die Bestimmung des mittleren Blutdrucks keinen Einfluss, ist aber in anderen Beziehungen nicht ganz gleichgültig. Das Quecksilber erhebt sich bei jeder Systole und sinkt bei jeder Diastole, und diese Excursionen von oben nach unten, welche offenbar der Wellengrösse entsprechen, stehen natürlich unter dem Einfluss der Röhrenweite; wäre beispielsweise die Röhre weiter als das Blutgefäss, in welches man sie einführt, so würden die Oscillationen eine entsprechende Verminderung erfahren. Aber sehr enge Glasröhren verkleinern die Wellen ebenfalls, indem sie die oscillirende Bewegung der Flüssigkeiten durch Reibung hemmen. — Bei sehr engen Röhren ist übrigens die Füllung mit Quecksilber und Natronlösung schwierig.

Man denke sich nun, das Blut dringe von *A* her in das Instrument, so wird, wenn die Röhre gleichmässig kalibrirt ist, das Quecksilber im absteigenden Schenkel *BC* eben so viel fallen, als im aufsteigenden Schenkel *DE* steigen. Will man also die Höhe der Quecksilbersäule bestimmen, welche durch den Blutdruck getragen wird, so muss man die Masszahl, um welche das Quecksilber im aufsteigenden Aste gestiegen ist, verdoppeln.

Hiermit ist jedoch die Bestimmung des Blutdrucks noch nicht gegeben. Gesetzt, das Quecksilber wäre in dem Schenkel *BC* um 100 Millimeter gefallen, so ist der Raum, den es einnahm, mit der nachdrängenden Mischung von Natronlösung und Blut erfüllt worden. Es lastet also eine 100 Millimeter hohe Säule vermischter Flüssigkeiten auf dem Quecksilber und vermehrt durch seine Schwere den Blutdruck. Offenbar muss diese mit-

wirkende Kraft in Abzug gebracht werden, wenn der Blutdruck allein gesucht wird. Setzen wir mit Poisseuille, die Mischung von Natronwasser und Blut habe ein spezifisches Gewicht von $\frac{1}{10}$ des Quecksilbers, so drückt eine Säule von 100 Millimeter Mischung eben so stark als eine Säule von 10 Millimeter Quecksilber. Kehren wir also zu der vorher beliebten Annahme zurück, dass das Quecksilber im aufsteigenden Schenkel um 100 Millimeter gestiegen sei, so betrüge der Blutdruck

$$100 + 100 - \frac{100}{10} = 190 \text{ Millimeter Quecksilber.}$$

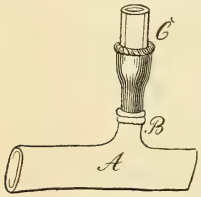
Im Allgemeinen berechnet man also den Blutdruck nach der Formel: $D = 2x - \frac{1}{y}x$, wo D den Druck, x die Elevation des Quecksilbers und $\frac{1}{y}$ das Verhältniss der spezifischen Schwere der Natronlösung zum Quecksilber angiebt.

§ 73. Weder Hales noch Poisseuille sind sich über die Bedeutung ihrer Versuche vollkommen klar gewesen. Beide nennen das, was sie messen, den Druck des Blutes, aber das Wort Druck ist vieldeutig und bedarf einer nähern Bestimmung. Die Hydrostatik berücksichtigt drei verschiedene Druckwerthe, welche in der oben erörterten Gleichung $H = w + f$ enthalten sind, einen Druck, w, zur Besiegung der Widerstände, einen Druck, f, zur Herstellung des Fliessens und einen Druck, H, welcher die Summe der beiden vorigen und diejenige Kraft ist, von welcher der Durchgang des Wassers durch eine Röhre in einer bestimmten Geschwindigkeit abhängt. Welcher dieser Werthe wird nun gemessen? Ich werde zeigen, dass die Antwort auf diese Frage keine ganz einfache ist.

Wenn wir den Hämodynamometer in eine Arterie einbinden, so wird der Seitendruck, welcher auf die Wandungen des Blutgefässes wirkt, mit gleicher Kraft auch auf das Quecksilber des Instrumentes wirken, denn dasselbe vertritt ja die Stelle einer vorgeschobenen Querwand. Das Instrument misst also den Seitendruck $s = w - \varsigma$, und, weil ς verschwindend klein, $s = w$.

Aber der Hämodynamometer misst nicht allein die Widerstandshöhe, w, sondern auch die Geschwindigkeitshöhe, f. Das Blut drückt nämlich auf das Quecksilber nicht nur wie eine ruhende Flüssigkeit, sondern drängt gegen dasselbe auch mit der Kraft seiner Strömung. Das strömende Blut wirkt auf das Quecksilber wie das Wasser eines Stromes gegen den eingerammten Pfahl, welcher mit fortgerissen wird, wenn er nicht fest steht. Indem also die Höhe des Quecksilberstandes von dem Drucke w ebensowohl als von dem Drucke f abhängt, ist das, was gemessen wird, der Werth H, d. h. die Totalität der Kraft, welche in dem berücksichtigten Gefässe sowohl die Widerstände besiegt, als die Bewegung zu Stande bringt.

§ 74. Verändern wir nun die Betrachtung ein wenig. Es sei



A die Aorte, B die Nierenarterie, welche rechtwinklig von der vorigen abgeht, und c der Hämodynamometer, so ist unverkennbar, dass wir dieselben physikalischen Bedingungen vor uns haben, welche im Cap. I, § 3 und folg. einer ausführlichen Erörterung unterworfen wurden. Die Aorte entspricht der Röhre, durch welche Wasser floss, der Hämodynamometer entspricht dem Druckmesser und die Nierenarterie vertritt die Stelle der Hülse, welche ich an meinen Wasserröhren anbrachte, um die Druckmesser aufrichten und einkitten zu können.

Wenn nun, wie früher ausführlich erwiesen wurde, der Druckmesser den Werth des Seitendrucks für den Punkt der Röhre bestimmt, über welchem er lothrecht aufgerichtet ist, so kann kein Zweifel sein, dass der Hämodynamometer im vorliegenden Falle den Seitendruck misst, welcher in der Aorte am Ursprunge der Nierenarterie statt findet.

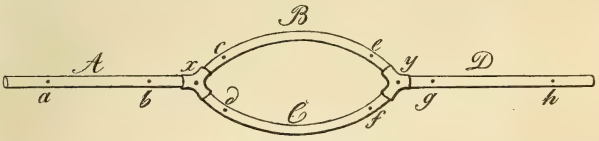
Dieser Seitendruck $= w' = H' - f'$ ist also gleich dem Werthe H in der Nierenarterie, woraus sich jetzt schon der für

die Theorie höchst wichtige und von Poisseuille gänzlich verkannte Grundsatz ergiebt, dass der Werth von H in den Stämmen der Arterien grösser als in deren Zweigen ist.

§ 75. Ich werde hierauf später zurückkommen und gehe jetzt zu der Frage über, ob der Hämodynamometer, in wie fern er den Druck H in einem Blutgefässe anzeigt, denselben unverfälscht angiebt? Letzteres ist nicht der Fall, vielmehr wird der Druck durch die Methode der Messung in die Höhe getrieben.

Um den Versuch zu verstehen, durch welchen ich diese Behauptung beweisen werde, hat der Leser zu bedenken, dass die Arterie, in welche man die Hämodynamometer einführt, das Collateralgefäss irgend einer anderen ist, welche ihrerseits das Blut weiter führt, welches durch die Anwesenheit des Instrumentes in der ersteren zu fliessen verhindert wird.

Ich bediente mich zur Untersuchung eines Apparates, welcher durch die beistehende Figur versinnlicht wird und welchen ich schon oben ausführlicher beschrieben habe (§ 43).



An diesem Apparate ist nachträglich bei B ein Hahn angebracht worden, welcher die bezügliche Röhre zu schliessen erlaubt, während er, vollständig geöffnet, die Strömung des Wassers durchaus nicht hindert. Der Wasserbehälter H hat eine Höhe von 294 Millimeter und wird während der Dauer des Versuches voll erhalten. Bei geöffnetem Hahne beträgt der Wasserabfluss in einer Minute 1,78 Liter, woraus sich eine Geschwindigkeit der Strömung von 771,2 Millimeter in der Röhre A und von 385,6 Millimeter in der Röhre B ergiebt. *) Der Seitendruck betrug unter diesen Verhältnissen im Druckmesser a 232 Millimeter

*) Da nämlich die Collateralarme B und C zusammen genommen doppelt

in c 156, in d 155, in g 68 Millimeter. — Bei geschlossenem Hahne dagegen waren die Druckhöhen: in a 247 Millimeter, in c 200, in d 148, in g 66 Millimeter. Der Wasserabfluss betrug bei diesem zweiten Versuche nur 1,53 Liter.

Man beachte nun, dass im zweiten Falle, nämlich bei geschlossenem Hahne, der Druckmesser c nach demselben Prinzip angebracht ist, als der Hämodynamometer in einem Blutgefässe. Der verschlossene Hahn verhindert die Bewegung des Wassers nicht anders, als die Quecksilbersäule, wenn sie eine gewisse Höhe erreicht hat, das weitere Vordringen des Blutes verhindert.

In dem eben angeführten Versuche steigt nach Verschluss des Hahns das Wasser des Druckmessers c von 156 Millimeter auf 200, also um 44 Millimeter. Dies Steigen könnte zunächst dadurch erklärlich scheinen, dass bei offnem Hahne nur w, bei geschlossenem dagegen $w + f$, also die ganze statische Kraft gemessen werde. Das Wasser, welches in die Collateralröhre B eindringt und nach Verschluss des Hahns gehemmt wird, äussert nämlich seine Stromkraft f nun dadurch, dass es die im Druckmesser c befindliche Wassersäule um ein Mehreres in die Höhe drängt. Bei dieser Auffassung, ich wiederhole es, würde der gefundene Druck von 200 Millimeter $= w + f = H$ sein. Sehen wir nun zu, ob diese Betrachtung mit den gegebenen Zahlenwerthen vereinbar ist.

Die Widerstandshöhe bei ungeschlossenem Hahne war erfahrungsmässig 156 Millimeter. — Die Geschwindigkeitshöhe f lässt sich berechnen, da die Geschwindigkeit mit 385,6 Millimeter durch den Versuch ebenfalls gegeben ist. Hiernach stellt sich der Werth von $f = \frac{v^2}{4g} = 6{,}62$ Millimeter und folglich der Werth von H für die Collateralröhre B bei offnem Hahne $= 156 + 6{,}62 = 162{,}62$, und nicht 200 Millimeter, welcher Druck bei verschlossenem Hahne gefunden wurde. Dies beweist also,

---

so weit waren als die Röhre A, von welcher sie die Zufuhr empfingen, so musste die Stromschnelle in ihnen genau halb so gross sein als in dieser.

dass der hohe Druck in c nicht dadurch erklärlich sei, dass bei geschlossenem Hahne $w + f$ für w gemessen werde.

Die Ursache, weshalb der Druck in c steigt, wenn der Hahn bei B geschlossen wird, ist in zwei sehr verschiedenartigen Umständen zu suchen, zunächst aber in einem wirklichen Zunehmen der Widerstände. Ich habe oben gezeigt, dass in zusammengesetzten Röhrensystemen die Vervielfältigung der Collateraläste den Abfluss begünstige, und umgekehrt Verschluss eines oder mehrerer solcher Zweige die Strömung hemme; es bedarf also die Zunahme der Widerstände von dieser Seite keiner weiteren Beweise. Aber ein zweiter Umstand, welcher Vermehrung der Widerstände nach sich zieht, ist folgender. Bei offnem Hahne und unbehinderter Strömung misst der Druckmesser den Seitendruck bei c, bei geschlossenem Hahne dagegen und behinderter Strömung misst derselbe Druckmesser den Seitendruck eines weiter aufwärts liegenden Punktes, nämlich des Punktes x, wo die Röhre B mit den Röhren A und C zusammenstösst. An diesem Punkte ist aber der Druck grösser als bei c, weil er der Einflussmündung des Röhrensystems näher liegt.*)

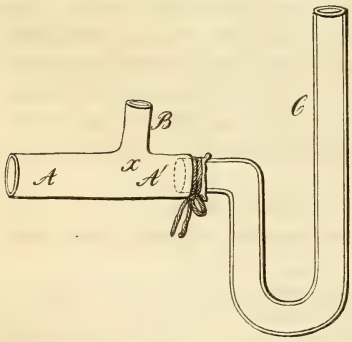
Das Resultat der vorstehenden Untersuchung ist dies, dass der Hämodynamometer den Werth H der mit ihm verbundenen Arterie nicht exact messe, sondern höher als in Wirklichkeit darstelle. Ich glaube Fälle beobachtet zu haben, wo die Ueberschätzung des genannten Werthes 14 Mm. Quecksilberdruck betrug, und werde später Gelegenheit nehmen, diese Bemerkung zu rechtfertigen.

§ 76. Brauchbarer ist der Hämodynamometer, wenn es sich um Bestimmung des Seitendrucks am Ursprunge einer Arterie

*) Man könnte noch fragen, warum in diesem Falle der bei c aufgerichtete Manometer den Druck bei x messe? Die Antwort ist, weil nach aufgehobener Strömung der Druck bei c eben so gross sein muss, als der Druck bei x. Dies beruht auf dem bekannten hydrostatischen Gesetze, dass in ruhenden Flüssigkeiten ein Druck auf jeden beliebigen Punkt mit gleicher Kraft auf alle wirkt.

handelt.*) Freilich können auch diese Messungen nicht genau ausfallen, wie theilweise aus dem Vorhergehenden schon ersichtlich ist. Da nämlich die Absperrung eines Collateralarmes, welche durch Poisseuilles Methode zu messen veranlasst wird, eine Vermehrung der Widerstände im gehemmten Blutsysteme hervorbringt, so muss sie auch eine Steigerung des Drucks am Ursprunge der bezüglichen Arterie zur Folge haben. Wahrscheinlich sind die Fehler, welche aus dieser Quelle entspringen, in den Fällen, wo an grösseren Schlagadern operirt wird, nicht unbedeutend, denn wenn Poisseuille durch Unterbindung der *aorta abdominalis* den Kreislauf im ganzen Hintertheile des Thieres unterdrückte, so stieg ein in der *art. carotis* angebrachter Druckmesser sogar auf die doppelte Druckhöhe.**)

Hierzu kommt noch, dass der Hämodynamometer den Seitendruck am Ursprunge einer Arterie doch nur in dem Falle rein darstellt, wenn die Arterie, in welche er eingeführt ist, rechtwinklig vom Stamme abgeht. Man braucht nur den oben erörterten Versuch an der Aorte und Nierenarterie (§ 74) im Gedanken umzukehren und sich vorzustellen, der Hämodynamometer *c* sei, statt in die *art. renalis*, *B*, in die *aorta abdominalis*, *A'*, unterhalb jener eingeführt worden, so ist klar, dass in diesem Falle das Quecksilber nicht blos unter dem Einflusse des Seitendrucks der Aorte, wie er an der Spaltungsstelle bei *x* statt findet, stehe, sondern auch un-



*) Ursprung heisst hier die Stelle, wo die Arterie, in welche das Manometer eingeführt ist, sich von ihrem nächstliegenden Collateralaste abzweigt.

**) *Brechet Repert. gén. d'Anatom. et de Physiol.* T. VI. p. 76.

ter dem Einflusse ihrer Stromkraft. Es wird keines Beweises bedürfen, dass dies Mal nicht w, sondern $w + f$ gemessen werde. Im Allgemeinen also wäre zu sagen, dass der Druckwerth, welchen der Hämodynamometer angiebt, durch den Winkel bedingt werde, welchen die Axe der bezüglichen Arterie mit der Richtung des Blutstroms an der Theilungsstelle macht. Bei der Verschiedenheit dieses Winkels könnte es nun scheinen, als ob die Messungen mit dem Hämodynamometer aller Sicherheit entbehrten, indess ist das Verhältniss von $f: w$ in den Schlagadern so klein, dass die eben erwähnte Fehlerquelle von sehr geringer Bedeutung ist.

§ 77. Ich habe bisher nur erörtert, was der Hämodynamometer in den Arterien messe, berücksichtigen wir nun auch die Venen. — Wenn man das Instrument mit der Mündung gegen die Capillaren in eine Vene einbindet, so wird der Blutlauf in dieser und in allen ihren Aesten bis zu den Punkten gehemmt, wo die Bewegung des Blutes durch Anastomosen mit benachbarten Blutadern ermöglicht wird. Da nach hydrostatischen Gesetzen der Blutdruck durch die ganze Strecke der Gefässe, in welcher die Flüssigkeit zum Stillstande kommt, gleich gross sein muss, so misst der Hämodynamometer im betreffenden Falle den Seitendruck an der nächstgelegenen Anastomose, die Richtung vom Instrumente gegen die Capillaren genommen. Es versteht sich von selbst, dass die Anastomose, von welcher hier die Rede ist, eine solche sein muss, welche den Uebergang des Blutes aus der unterbundenen Vene in eine für den Kreislauf offene auch wirklich gestatte.

Die beistehende Figur mag eine Partie des Venensystemes darstellen,

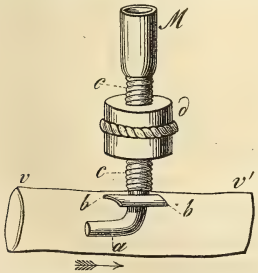
und wir nehmen an, der Hämodynamometer sei bei a''' angebracht und mit seiner Mündung gegen die Capillaren, also gegen $a'' a' a$ u. s. w. gerichtet. In diesem Falle wäre c die nächste Anastomose, und die Höhe der Quecksilbersäule würde dem Drucke bei a'' entsprechen, wenn die Anastomose c nicht das Blut durch Zweig $g g'$ in das unterbundene Gefäss zurückführte. Die nächstfolgende Anastomose ist die bei d, die Beobachtung wird also den Druck im Punkte a' ergeben, wenn der anastomotische Zweig d den Uebertritt des Blutes aus der Vene a a' in die benachbarte und nicht unterbundene Ader b b' b'' wirklich gestattet. Gesetzt aber, der Verbindungszweig d wäre mit einer Klappe versehn, so wäre ein derartiger Uebertritt des Blutes nicht hier, sondern erst in der Anastomose e möglich, und nun würde, weil in der ganzen Gefässstrecke zwischen a und a''' das Blut still steht, der Seitendruck des Punktes a gemessen.

Setzen wir den Fall, es fehlte an geeigneten Anastomosen zwischen den Nachbarvenen gänzlich, so würde der Hämodynamometer den Druck des venösen Haargefässsystems messen, und nehmen wir endlich an, das Instrument wäre in das einzige rückführende Gefäss eines Gliedes eingebracht, so könnten wir durch den Versuch nur den Druck der entsprechenden Arterie erfahren. Ein Experiment Poisseuilles bestätigt diese Behauptungen, denn als sämmtliche Schenkelvenen mit Ausnahme der *vena cruralis* unterbunden worden waren, zeigte der in letztere eingeführte Hämodynamometer einen Blutdruck, welcher dem der Schenkelarterie gleich kam.

Indem die Hämodynamometerversuche an Venen alles Mög-

liche bedeuten können, bedeuten sie im Grunde gar nichts. Ueberhaupt aber dürfte klar geworden sein, dass die von Hales und Poisseuille vorgeschlagenen Methoden zur Bestimmung des Blutdrucks noch einer weiteren Ausbildung bedürfen, und dass die von ihnen gewonnenen Resultate nicht ohne grosse Vorsicht und Kritik sich brauchen lassen.

§ 78. Ein Instrument zum Messen des Blutdrucks ist von *Ludwig* erfunden und von *Mogk* beschrieben und angewendet worden. *) Dieser Druckmesser unterscheidet sich von den schon beschriebenen nur durch das Mundstück. Letzteres besteht nämlich aus einem rechtwinklig gebogenen Rörchen, welches durch einen kleinen Längenschnitt in die Wandung des Blutgefässes so eingeführt wird, dass das umgebogene Ende in der Axe der Ader mit seiner Mündung dem Blutstrome entgegen liegt. Eine sinnreiche Einrichtung gestattet den Verschluss des kleinen Längenschnittes, durch welchen das gebogene Röhrchen in das Innere des Gefässes eingeführt wurde. Der Schnitt wird zusammengequetscht durch zwei Theile des Mundstücks, welche denselben in die Mitte nehmen und dann unter Beihülfe einer Schraube sich nähern. Die quetschenden Theile sind eine kleine, an dem gebogenen Röhrchen befestigte Platte nach innen und eine etwas breite laufende Schraube nach aussen.



In der Figur bedeutet *v v'* die Vene, *a* das unter rechtem Winkel gebogene Röhrchen, und *bb* die kleine schmale Platte, welche der Gefässwandung parallel unter den Schnitt zu liegen kommt, durch welchen sie selbst und das gebogene Röhrchen eingeschoben wurde. An dem Theile des Mundstücks *M*, welcher sich ausserhalb der Ge-

*) *Mogk, de vi fluminis sanguinis in venarum cavarum systemate. Marburgi Cattorum* 1843.

fässhöhle befindet, ist das dem Gefässe zunächst liegende Ende mit einem Schraubengewinde *c* versehn, auf welchem eine Schraubenmutter *d* hin und her laufen kann. Richtet man die Bewegung dieser laufenden Schraube gegen die Ader hin, so wird der in der Gefässwandung angebrachte Längenschnitt zwischen ihr und der kleinen Platte zusammengepresst und vollkommen undurchdringlich.

Das eben beschriebene Instrument wurde zur Untersuchung des Blutdrucks in den Venen bestimmt. Mogk hatte nämlich bemerkt, dass Versuche mit dem Hämodynamometer, auch wenn sie in einer und derselben Vene verschiedener Individuen angestellt wurden, so überaus verschiedene Resultate ergaben, dass die Brauchbarkeit derselben im höchsten Grade verdächtigt wurde. Als eine Hauptquelle des Irrthums sah Mogk den Umstand an, dass durch den Hämodynamometer die Circulation des Venenblutes verhindert wurde. Macht das Thier, an welchem man experimentirt, eine heftige Bewegung, so wird das Blut, welches der Klappen wegen nicht rückwärts kann, mit Gewalt in den Abschnitt der Venen getrieben, welcher den Tubulus des Instrumentes in sich aufnimmt; es entsteht also, da dem Fluidum auch der Abfluss zum Herzen abgeschnitten ist, eine übertriebene und anhaltende Spannung.

Diesen Uebelständen begegnet nun das neue Instrument in so fern, als es die Circulation in der beprüften Vene nicht hindert. Eine genauere Erörterung verdient indess die Frage, welche Art von Druck es messe? Zunächst kann kein Zweifel sein, dass die in der Glasröhre des Instrumentes befindliche Flüssigkeit (entweder das eingedrungene Blut selbst, oder die vor dem Versuche eingebrachte Natronlösung) unter dem Einflusse des Seitendrucks stehe, welcher an dem Punkte statt findet, wo die Einflussöffnung des gebogenen Röhrchens liegt. Aber zweitens steht die Flüssigkeit auch unter dem Einflusse der Stromkraft, denn das gebogne Röhrchen liegt ja in der Richtung des Stroms und seine Einflussöffnung ist diesem zugewendet. Hiernach schiene

anzunehmen, das Instrument messe $w + f = H$, d. h. die ganze statische Kraft, welche aufgeboten ist, um die Widerstände zu gewältigen und die Strömung mit ihrer bestimmten Geschwindigkeit zu Stande zu bringen. Irre ich nicht, so hat auch Mogk die Sache in dieser Weise aufgefasst, wenigstens sagt er: *nunc enim haemodynamometrum in ea parte apertum est, a qua flumen accurrit, ideoque omnem vim, quae a hac parte affluit, emetiri poterit.* *)

Diese Auffassung ist indess nicht ganz richtig, wie sich aus der Theorie der Pitotschen Röhre ergiebt. Der französische Physiker Pitot benutzte nämlich eine unter rechtem Winkel gebogene Glasröhre zur Bestimmung der Geschwindigkeit eines fliessenden Wassers. Die Röhre, welche ungefähr 1 Zoll Durchmesser hat, und deren einer Schenkel sich trichterförmig erweitert, wird im Wasser auf die Weise befestigt, dass der Trichter dem Strome entgegengerichtet ist, während der zweite Schenkel der Röhre senkrecht über dem Wasserspiegel emporragt.**) Der in den Trichter eindringende Strom treibt nun das Wasser im lothrechten Schenkel bis zu einem Punkte, dessen Höhe über dem Wasserspiegel der Stromschnelle proportional ist. Erführe das Wasser in seiner Bewegung gar keine Hindernisse, so würde es bis zu einer Höhe aufsteigen müssen, welche der Geschwindigkeitshöhe, f, des Stromes gleich käme. Nun ist $f = \frac{v^2}{4g}$, die Höhe aber, bis zu welcher das Wasser im Strommesser aufsteigt, ist nicht $= \frac{v^2}{4g}$, sie ist z. B. beträchtlich geringer, wenn der Trichter nicht weit genug ist, und es bedarf daher auf der rechten Seite der Gleichung noch eines Coëfficienten, m, welcher auf

*) Dass die Worte *omnis vis* die ganze statische Kraft, unser H, bedeuten sollen, muss ich noch deshalb glauben, weil Mogk sein Instrument von dem Spenglers unterscheidet (pag. 32), welches, wie unten zu zeigen, ausschliesslich den Seitendruck misst.

**) Der Trichter muss eine bedeutende Oeffnung haben, ungefähr so, dass die Seiten desselben einen Winkel von 60° einschliessen.

empirischem Wege zu suchen ist. Man erhält also für die Pitot-sche Röhre die Formel $f = m. \frac{v^2}{4g}$.

Es kann nun kein Zweifel sein, dass der von Ludwig erfundene Druckmesser nach der Theorie des eben beschriebenen Instrumentes von Pitot zu beurtheilen ist. Derselbe soll messen $w + f$, d. h. $w + m. \frac{v^2}{4g}$; um also die Grösse dieser Summe beurtheilen zu können, müsste der Werth des Coëfficienten gegeben sein, was nicht der Fall ist. Nur so viel ist klar, dass Mogks Druckmesser den Werth f nicht vollständig messen konnte, weil der horizontale Schenkel des Röhrchens (a der obigen Figur) nicht trichterförmig erweitert war.

Aus allem Mitgetheilten ergiebt sich, dass Ludwigs Instrument die Widerstandshöhe, vermehrt durch ein unbekanntes Bruchstück der Geschwindigkeitshöhe, darstellt, und dass der gefundene Druckwerth für den Punkt der Gefässhöhle gilt, welcher mit dem Mundstücke des Manometers in Verbindung steht.

Wenn nun im vorigen Paragraphen die Bemerkung gemacht wurde, dass f im Verhältniss zu w eine sehr geringfügige Grösse sei, so könnte es scheinen, dass Mogk die Kraft H, welche er suchte, und welche $= w + f$, bis auf einen höchst geringen Fehler wirklich gefunden habe. Indess bezog sich jene Bemerkung nur auf die hämodynamischen Verhältnisse der Arterien, und Mogk untersuchte den Druck in den Venen. In diesen dürfte das Verhältniss $\frac{f}{w}$ eine nicht zu vernachlässigende Grösse sein, weil w, wie unten zu beweisen, in den Venenstämmen überaus geringe Werthe hat.

§ 79. Ein Hauptbedürfniss für die Hämodynamik war die Beschaffung eines Instrumentes, welches den reinen Seitendruck zu messen erlaubte. Ludwig hat zuerst ein solches angegeben und durch einen seiner Schüler beschreiben lassen.*) An dem Hämodynamometer Poisseuilles wird ein Mundstück angebracht,

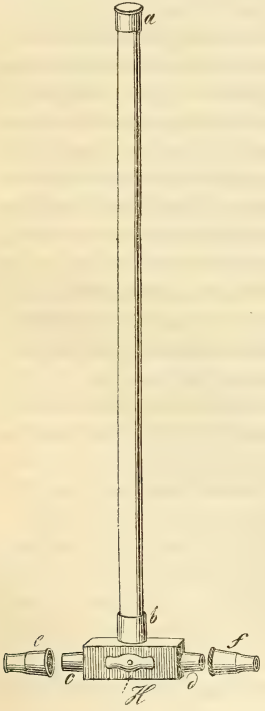
*) *Spengler, Symbolae ad Theoriam de sanguinis flumine. Marburgi* 1843.

das dem sehr ähnlich ist, was im vorigen Paragraphen beschrieben und abgebildet wurde. Der einzige Unterschied besteht darin, dass das rechtwinklig umgebogene Röhrchen (*a* der Figur) in Wegfall gekommen ist. In Folge dieser Modification liegt die Mündung des Instrumentes nicht dem Blutstrome entgegen, sondern die Kanüle, durch welche das Blut in den Hämodynamometer dringt, bildet mit der Axe des Gefässes einen rechten Winkel. Daher steht auch die Quecksilbersäule nicht unter dem Einflusse der Stromkraft, sondern ausschliesslich unter dem des Seitendrucks.

Ich habe denselben Zweck mit geringeren Mitteln dadurch erreicht, dass ich statt der einfachen Kanüle, welche Poisseuille am Mundstück seines Hämodynamometers anschraubte, dreischenklige Röhrchen von ⊤förmiger Gestalt anfertigen liess. Von den beiden Schenkeln, welche in einer geraden Linie liegen, wurde der eine in das centrale, der andere in das peripherische Ende des durchschnittenen Blutgefässes eingeführt, der dritte Schenkel diente als Hülse, in welche die Hämodynamometerröhre eingesteckt wurde. Es ist nothwendig für jeden Druckmesser mehrere derartige Ansatzstücke von verschiedenem Kaliber zu besitzen, indem die beiden Röhrenschenkel, welche in das Blutgefäss eingebunden werden, im Durchmesser diesem möglichst gleichen müssen.

§ 80. Ich habe ein Instrument zum Messen des Blutdrucks construiren lassen, welches sich unter Umständen sehr brauchbar erweist. Das Blut dringt wie bei Hales in eine verticale Glasröhre, nur dass diese an ihrem oberen Ende geschlossen ist. Das eindringende Fluidum steigt bis zu einem Punkte, wo die Resistenz der zusammengedrückten Luft dem Blutdrucke das Gleichgewicht hält. Da nun dem Mariotteschen Gesetze zu Folge das Volumen der Gase sich umgekehrt verhält, wie der Druck, dem sie ausgesetzt sind, so wird sich aus dem Volumen der im oberen Ende der Glasröhre comprimirten Luft der Druck, welchen das Blut ausübt, sehr leicht berechnen lassen.

Gesetzt z. B., die Glasröhre hätte eine Länge von 500 Millimeter, und das Blut, welches in sie eindringt, stiege bis 100 Millimeter, so wäre die Luft auf $\frac{4}{5}$ ihres ursprünglichen Volumens reducirt. Der Druck, welcher diese Compression hervorbringt, muss also dem Gesetze zu Folge $\frac{5}{4}$ des Drucks betragen, welcher vor dem Eindringen des Blutes statt hatte, d. h. $\frac{5}{4}$ vom Drucke einer Atmosphäre. Zieht man von diesem Drucke den einer Atmosphäre ab, so bleibt $\frac{1}{4}$ Atmosphäre $= \frac{760}{4}$ Millimeter Quecksilber für den Blutdruck übrig.



Die Einrichtung meines Manometers ist aber folgende: Die Glasröhre *ab* ist rechtwinklig in einen sehr kurzen Tubulus von Messing, *cd*, eingelassen, welcher die Bestimmung hat, dem Blute zum Durchgang zu dienen. Beide Röhren stehen in offener Verbindung. Der messingne Tubulus ist an beiden Enden konisch abgearbeitet, so dass sich an die Kegel *cd* zwei Kanülen *ef* anstecken lassen, welche vorher in die Enden des durchschnittenen Blutgefässes eingebunden worden. Weiter ist der Tubulus mit einem Hahne *H* von $1\frac{1}{2}$ Bohrung versehen. Die ganze und die halbe Bohrung stossen rechtwinklig auf einander. Wird der Hahn so gestellt, dass die halbe Bohrung der Glasröhre zugewendet ist, so fliesst das Blut nicht nur durch den Tubulus, sondern dringt auch in die Glasröhre; ist dagegen die halbe Bohrung von

der Glasröhre diametral abgewendet, so kann das Blut zwar durch das Messingröhrchen seinen Kreislauf fortsetzen, kann aber im Manometer nicht eindringen. Die letzte Stellung wird man also dem Hahne vor dem Beginne jedes Versuches geben, und wird sie mit der entgegengesetzten nicht eher vertauschen, als bis alle Vorbereitungen vollendet sind. Würde man den Hahn durch eine Drehung von 90^0 so stellen, dass die halbe Bohrung in die Längenaxe des Tubulus fiele, so würde nothwendig die ganze Bohrung desselben in die Richtung der Glasröhre zu liegen kommen; in diesem Falle wäre die Blutbewegung durch den Tubulus verhindert, dagegen das Eindringen des Blutes aus dem einen oder anderen Ende der Arterie in die Manometerröhren nicht gehindert. Je nachdem nun die halbe Bohrung des Hahnes dem centralen oder peripherischem Ende des Blutgefässes zugerichtet wäre, würde so zu sagen der centrale oder peripherische Blutdruck gemessen werden.

Nachträglich bemerke ich, dass die Glasröhre mit dem Tubulus durch einen Schraubengang verbunden und an ihrem oberen Ende durch eine anzuschraubende Kapsel hermetisch verschlossen ist. Bei dieser Einrichtung lässt sich die Röhre leicht abnehmen, von beiden Seiten öffnen und nöthigenfalls reinigen. Soll der Manometer zu einer länger dauernden Beobachtung benutzt werden, so fülle ich einen Theil der Glasröhre mit concentrirter Natronlösung. Ich habe nämlich eine Injectionsspritze so einrichten lassen, dass die Mündung derselben die konischen Enden des Tubulus genau aufnehmen kann; nun spritze ich die Kalilösung gewaltsam durch den Tubulus und lasse durch einen Assistenten in dem Momente, wo die Flüssigkeit in der Glasröhre bis zu einem gewissen Punkte gestiegen, den Hahn schliessen. Dies geschieht, wie oben bemerkt wurde, dadurch, dass man die halbe Bohrung nach unten dreht. Mein Druckmesser hat vor Poisseuilles Hämodynamometer Manches voraus. 1) Lässt sich mein Instrument auch in tiefliegenden Gefässen, z. B. im Grunde der Bauchhöhle anbringen, was bei der Gestalt des Hämodyna-

mometers unmöglich ist. 2) Erfordert mein Manometer keine ängstliche Berücksichtigung der perpendiculären Lage der Röhre, wenigstens dann nicht, wenn letztere von geringem Durchmesser ist. 3) Gestattet mein Instrument eine grössere Genauigkeit in den Beobachtungen. In Poisseuilles Hämodynamometer wird der Blutdruck dadurch bestimmt, dass man die Veränderung im Niveau der Quecksilbersäule beobachtet. Die Grösse dieser Veränderung beträgt nicht leicht über 80 Millimeter. Irrt man beim Ablesen der Masszahl um 2 Millimeter, was bei schnellen und heftigen Pulsschwankungen allerdings möglich ist, so irrt man um $\frac{1}{40}$. Giebt man dagegen in meinem Instrumente der Glasröhre eine Länge von 1 Meter, so erhebt sich das Blut in demselben annäherungsweise auf 180 Millimeter, und irrt man dies Mal beim Ablesen der Zahl um 2 Millimeter, so ergiebt sich ein Fehler von nur $\frac{1}{90}$. 4) Kann man durch eine blosse Umstellung des Hahnes zwei Druckwerthe bestimmen, nämlich den centralen und den peripherischen.

Etwas unbequem ist freilich, dass jede Beobachtung, um ein Resultat zu liefern, erst berechnet werden muss.

§ 81. Bei Weitem das vorzüglichste Instrument zum Bestimmen des Blutdrucks ist das von Ludwig erfundene Kymographion, welches durch Aufzeichnung einer Curve die wechselnden Druckwerthe graphisch darstellt. Ich habe diesen Apparat Tab. I abgebildet. Das Wesentliche der Einrichtung besteht darin, dass das oscillirende Quecksilber des Manometers ein mit einer Schreibfeder versehenes schwimmendes Stäbchen auf- und abbewegt, welches die Excursionen derselben auf einem Papierbogen verzeichnet, der mit stetiger Geschwindigkeit an der Feder vorbeigeführt wird.*)

Der Druckmesser ist dem Hämodynamometer Poiseuilles vollkommen gleich; in dem aufsteigenden Aste desselben befindet sich der Schwimmer. Dieser besteht aus einem eisernen

*) *Ludwig* in *Müllers* Archiv 1847. S. 242. Tab. X—XIV.

Prisma, nahezu von der Länge des aufsteigenden Astes der Glasröhre, in welchen er eingeführt wird, und ist so dick, dass seine scharfen Kanten von den Röhrenwandungen etwa 1,5 Millimeter entfernt bleiben. An diesem Prisma lässt sich ein kleiner elfenbeinerner Cylinder auf- und abschieben, welcher einen Zoll lang und fast so dick als das *lumen* der Röhre ist. Die Verschiebung des Cylinders wird dadurch möglich, dass er in der Richtung der Längenaxe durchbohrt und innerhalb des Bohrloches dreikantig ausgefeilt ist. Wenn man nun das Prisma in die mit Quecksilber gefüllte Röhre einführt, so wird es nicht nur schwimmen, sondern auch ungefähr zur halben Länge aus dem Quecksilber hervorragen. Man stellt also den verschiebbaren Cylinder so ein, dass dessen unterer Querschnitt genau auf die Oberfläche des Quecksilbers zu stehen kommt. Unter diesen Umständen muss jede positive Welle des Quecksilbers den Cylinder und mit ihm den ganzen Schwimmer heben, und wiederum wird dieser vermöge seiner grossen Schwere keinen Augenblick zögern, mit jeder negativen Welle herabzusinken.

Es muss nun so viel Quecksilber in die Glasröhre gegossen werden, dass der Schwimmer mit seinem oberen Ende ein wenig über die Glasröhre, in welcher er schwimmt, hervorragt, denn an diesem Ende soll die Feder zum Verzeichnen der Curven befestigt werden. Es bedarf nun keineswegs so künstlicher Schreibfedern, wie Ludwig herstellte, sondern jeder leidlich geschnittene Gänsekiel ist brauchbar, wenn er durch ein Zwischenglied von geeigneter Elasticität mit dem Schwimmer verbunden ist. Dem Zwecke vollkommen entsprechend ist folgende einfache Vorrichtung: Man lässt an dem oberen Ende des Schwimmers eine grosse längliche Oese, wie die einer groben Nähnadel, anbringen. Durch diese Oese wird ein breites, aber dünn geschabtes, also sehr biegsames Fischbein so durchgesteckt, dass es mit dem Prisma einen rechten Winkel bildet und nach Belieben hin- und hergeschoben werden kann. Das eine Ende dieses Fischbeins ist aber in der Weise geformt, dass ein kurzes Stück eines als

Feder geschnittenen Gänsekieles an denselben angesteckt werden kann. Durch das elastische Fischbein soll die Feder mit einem Minimum von Kraft gegen die sich vorbeibewegende Papierfläche gedrückt werden, denn hierdurch allein können die nachtheiligen Folgen der Friction beseitigt werden, mit welchen Ludwig beim Zeichnen seiner Curven zu kämpfen hatte. Ich will übrigens nicht unbemerkt lassen, dass feine Miniaturpinsel mir noch bessere Dienste geleistet haben als Federn, indem letztere in Folge der horizontalen Stellung öfters nicht angeben, was bei Pinseln nie vorkommt.

Sowohl der Pinsel wie die Feder bedarf eines leisen Drucks gegen die Papierfläche, und dieser Druck ist nur möglich, wenn das Prisma, an welchem sie befestigt sind, einen Widerstand bietet. Zu dem Ende muss der Schwimmer in einer Führung gehen. Die Glasröhre, in welcher der Schwimmer enthalten ist, muss einen Deckel mit einem dreieckigen Loche haben, durch welches das Prisma läuft. Wiederum muss dieser Deckel, wie der einer runden Schnupftabaksdose, eine Drehbewegung gestatten, damit man durch ein geeignetes Drehen desselben das Prisma richten und die Feder leise gegen das Papier drücken kann. (Vergl. Tab. II, Fig. 2 und 3.)

Das Papier, auf welchem die Curve gezeichnet werden soll, ist über einen Cylinder gespannt, welcher sich um seine perpendiculär gestellte Axe dreht. Die bewegende Kraft geht von einem Uhrwerk mit Feder aus, dessen Beschreibung nicht nothwendig scheint, da jeder geübte Mechanicus ein solches ohne nähere Angaben zu fertigen weiss. Ich beschränke mich daher auf die Bemerkung, dass die gleichmässige Geschwindigkeit der Bewegung durch einen Rotationspendel vermittelt werden kann.

Das Gestelle, welches zur Aufstellung des Uhrwerkes und Cylinders erforderlich ist, gestattet den Druckmesser (oder besser deren zwei) in fester Weise anzubringen, was nothwendig ist, da jede Bewegung des Instrumentes die Gestalt der Curve ändern würde. Sehr zweckmässig geschieht die Befestigung so, dass

man die Brettchen, auf welchen die Manometerröhren mit ihren Scalen befestigt sind, nach Art unserer Thüren an dem Gestelle anbringt, d. h. in der Weise, dass sie sich in Angeln drehen. Bei dieser Einrichtung erhält der horizontale Ast des Manometers eine freie Bewegung in horizontaler Richtung. Ausserdem muss man dafür sorgen, dass die Manometer auch in perpendiculärer Richtung verschoben und fixirt werden können, was keine Schwierigkeit hat. Die angegebene doppelte Bewegung ist deshalb wünschenswerth, weil ausserdem die Einbringung des Hämodynamometers in das Blutgefäss Schwierigkeiten machen würde. Es ist begreiflicher Weise leichter, die Stellung des Druckmessers der Lage des Thieres, als diese der Stellung des Instrumentes anzupassen.

Wer die vorstehende Beschreibung mit der von Ludwig vergleicht, wird finden, dass ich die Construction des Schwimmers und der Feder verändert habe. Ich will nicht unterlassen zu bemerken, dass Ludwig diese Veränderungen bereits geprüft und als wünschenswerthe Verbesserungen auch an seinem Instrumente angebracht hat.

Soll nun der Apparat benutzt werden, so muss man vor Allem an das Verzeichnen einer Linie denken, welche die Bestimmung der Abscissen und Ordinaten der Blutdruckcurve gestatte. Sobald also der Druckmesser in der für das Experiment geeigneten Lage fixirt worden ist, lässt man den Cylinder eine Umdrehung machen, und zwar noch ehe der Hahn des Manometers geöffnet worden ist, welcher vorläufig das Blut vom Quecksilber absperrt. Unter diesen Umständen verzeichnet die Feder eine gerade Linie bei Nulldruck. Hat nun der Cylinder seinen Umlauf vollendet, so öffnet man den Hahn, und es bildet sich nun unter dem Einflusse des Herzdrucks eine zweite Linie über der ersten. Diese zweite Linie ist die verlangte Curve, ihre Erhebung über die erste oder Abscissenlinie entspricht dem halben Blutdrucke.*)

*) Nach den § 72 erörterten Prinzipien, wo auch bemerkt ist, wie die

Die Wichtigkeit des von Ludwig erfundenen Instrumentes für die Experimentalphysiologie wird es rechtfertigen, wenn ich über die Benutzung desselben mir nachträglich noch einige Bemerkungen erlaube.

Bisweilen ist es wichtig, zwei isochrone Curven zu zeichnen, um zu ersehen, was an verschiedenen Punkten des Gefässsystems gleichzeitig vorgeht. Um solche zu erhalten, verfährt man am bequemsten und sichersten auf folgende Weise. Am Gestelle des Kymographion werden zwei Druckmesser mit Schwimmern so angebracht, dass beide gleichzeitig am Cylinder schreiben können. Ist das Experiment in der Weise eingeleitet, dass die Federn oder Pinsel beider Instrumente ihre Curven ziehen, und haben letztere in Folge der Umdrehung des Cylinders bereits eine genügende Länge erhalten, so hemmt man den Gang des Uhrwerkes plötzlich, was durch Anhalten des Rotationspendels leicht ausführbar ist. Ehe man nun den Schwimmer mit Hülfe der ihn führenden Kapsel wendet und dadurch die Feder vom Papiere entfernt, gestattet man dieser noch ein Paar Linien zu ziehen, die bei ruhendem Cylinder nothwendig lothrecht ausfallen und sich decken müssen. Es entsteht also am Ende jeder Curve eine lothrechte Linie als Schlusszeichen, und beide Senkrechte entsprechen natürlich zweien in der Zeit zusammenfallenden Momenten in der Curvenbildung. Mehr bedarf es nicht, um den Isochronismus jedes beliebigen Punktes zu bestimmen, denn offenbar sind alle Punkte beider Curven, welche von ihren bezüglichen Schlusslinien aus unter gleichen Abscissen liegen, die gesuchten Isochronen.

Oft ist es unmöglich, den Druckmesser in das Gefäss unmittelbar einzuführen, sondern es bedarf einer Röhre als Verbindungsstück zwischen beiden. In den Fällen, wo man isochrone Curven an weit aus einander liegenden Arterien grösserer Thiere zu ge-

---

Mitwirkung der Natronlösung beim Drucke in Rechnung gezogen werden muss.

winnen beabsichtigt, müssen diese Verbindungsstücke eine ansehnliche Länge haben, und dann sind mancherlei Schwierigkeiten zu überwinden.

Ich benutze Zinnröhren von 7 Millimeter Durchmesser als Verbindungsstücke (Tab. II, Fig. *C C′ C″*), welche den grossen Vortheil gewähren, sich nach den gegebenen räumlichen Bedingungen gestalten und biegen zu lassen.

Eine luftdichte Befestigung der Zinnröhren an dem horizontalen Aste des Hämodynamometers lässt sich einfach und bequem durch einen Korkstöpsel herstellen (Fig. 1 *D*). Der Kork wird der Länge nach durchbohrt, vorsichtig ausgefeilt, und in den auf diese Weise gebildeten Kanal wird von der einen Seite das mit Fett bestrichene Ende der Zinnröhre, von der anderen der horizontale Ast des Hämodynamometers eingeführt. Letzterer wird durch das Gewicht der Glasröhre der Gefahr des Zerbrechens ausgesetzt, man muss also am Kymographion noch eine Vorrichtung zur Unterstützung der Zinnröhre anbringen.*)

An das freie Ende der Zinnröhre lässt sich ein messingner Hahn (Fig. 1 *F*) anstecken, und an das kegelförmig auslaufende Ende dieses Hahnes passt wieder die Kanüle, welche man in die geöffnete Ader einbindet. Der Nutzen des verschliessbaren Hahnes ist aber ein sehr vielfältiger. Hat man das Kymographion bereits mit dem Gefässsysteme in Verbindung gebracht, so kann man nicht nur durch Oeffnen und Schliessen des Hahnes den Versuch in jedem beliebigen Augenblicke beginnen und enden, sondern man kann auch durch ein mehr oder weniger vollständiges Oeffnen desselben die Oscillationen des Quecksilbers beschränken,

*) Fig. 1 Tab. II zeigt eine derartige Vorrichtung. Eine Leiste *G G′*, welche durch 2 Schrauben *a a′* an die hölzerne Unterlage *A A′* des Hämodynamometers befestigt ist, verläuft theilweise unter, theilweise neben der Zinnröhre. Zur Unterstützung der letzteren dient nun das Klötzchen *H*, welches mittelst eines Ausschnittes an seiner unteren Fläche sattelartig auf der Leiste aufsitzt und zwischen *G* und *G′* beliebig hin- und hergeschoben werden kann.

was oft wünschenswerth ist, da zu grosse Wellen unvollkommene Curven geben.

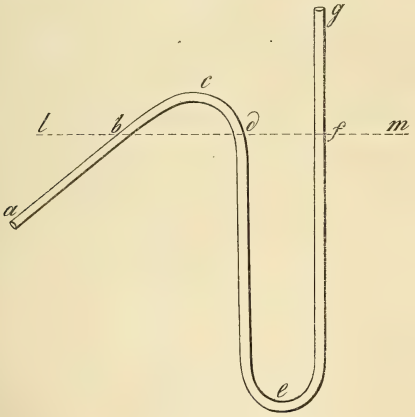
Man kann ferner mit Hülfe des Hahnes dem Uebelstande begegnen, dass aus dem Gefässsysteme Blut in den Manometer übergehe und im Thiere den Anfang einer Anämie begründe, welche den Blutdruck sogleich vermindern würde. Um diesen Zweck zu erreichen, injicire ich die Zinnröhre mittelst einer Spritze mit Natronlösung, bringe durch die Kraft des angewendeten Drucks das Quecksilber zum Steigen und lasse durch einen Assistenten den Hahn schliessen, sobald eine ungefähr passende Druckhöhe erreicht ist. *)

Endlich dient der Hahn zum Füllen der Zinnröhre mit einer Auflösung von kohlensaurem Kali oder Natron. Die gebogene Röhre ist auf ihrem höchsten Punkte mit einer Oeffnung versehen, welche sich durch einen Stöpsel *E* luftdicht verschliessen lässt. Diesen Stöpsel entfernt man und injicirt bei verschlossenem Hahne durch die obere Oeffnung die erwähnte Solution. Die Lage der Oeffnung am höchsten Punkte der Röhre bewirkt, dass alle Luft durch dieselbe entweicht, und erst wenn man sich überzeugt hat, dass dies vollständig geschehen ist, verschliesst man die Röhre wieder mit Hülfe des Stöpsels.

Schliesslich habe ich vor einem Missgriffe zu warnen, welcher beim Ziehen der Abscissenlinie dem Unerfahrnen sehr leicht begegnen könnte. Die Abscissenlinie soll, wie früher erläutert wurde, bei Nulldruck gezogen werden, damit von ihr aus bis zur Pulscurve die Ordinaten des Blutdrucks gezogen werden können. Es entsteht also die Frage: wie erhält man in Fällen, wo man den Hämodynamometer durch eine Ansatzröhre ver-

*) Bei grossen Thieren ist diese Vorsichtsmassregel überflüssig, bei sehr kleinen dagegen äusserst wichtig. Wenn bei einer Taube z. B. das Quecksilber im aufsteigenden Schenkel der Glasröhre 70 Millimeter steigen soll, und diese eine Durchschnittsfläche von 38 □Millimeter hat, so werden dem Thiere 2,66 Cub. Centimeter Blut entzogen, was den statischen Druck um ein Merkliches vermindern dürfte.

längert, den Nulldruck? Es ist ziemlich einladend anzunehmen, das Quecksilber befinde sich unter Nulldruck, wenn man die Ansatzröhre bei geschlossenem Hahne gefüllt und deren Mündung bei *E* offen gelassen habe. Dem entsprechend würde dann auch die Abscisse unter solcher Bedingung zu ziehen sein und doch würde dies jedes Mal einen Fehler geben, wenn die Mündung der Ansatzröhre in Folge einer Biegung derselben nach unten tiefer zu liegen käme als das Niveau des Quecksilbers im aufsteigenden Schenkel des Druckmessers. In solchen Fällen würde nämlich die Abscissenlinie zu hoch und folglich der Pulscurve zu nahe liegen.



Es sei *a b c d e f g* eine Röhre, welche bei *a* verschlossen und mit Ausnahme des Abschnittes *fg* vollständig mit Wasser gefüllt ist. Ferner sei *lm* eine Wagerechte, welche den höchsten Wasserstand in *f* schneidet. Nun werde die Röhre bei *a* geöffnet, dann wird nothwendig das Wasser unter das frühere Niveau bei *f* herabsinken und aus dem nach unten gerichteten Röhrenschenkel *a b c* theilweise auslaufen müssen. In communiciren-

den Röhren setzen sich nämlich die Fluida ins Gleichgewicht. Nun besteht ein Gleichgewicht zwischen den Wassermassen *fe* und *de*, desgleichen zwischen *cd* und *cb*, aber das Wasser zwischen *ab* findet kein Gegengewicht, es strebt also vermöge seiner Schwere nach unten und stört dadurch das Gleichgewicht der zwischen *bcdef* befindlichen Massen durch einen negativen Druck.

Natürlich gelten diese Gesetze auch für den Hämodynamometer, welcher theilweise mit Wasser und theilweise mit Quecksilber gefüllt ist. Hat man die Zinnröhre *C C′ C″* gefüllt und die Oeffnung bei *E* verschlossen, so sinkt bei Oeffnung des Hahnes *F* das Quecksilber im aufsteigenden Aste um so merklicher, je tiefer die Mündung des Hahnes unter dem Niveau des Quecksilbers steht. Mit diesem Sinken äquilibriren sich erst die in den Röhren befindlichen Fluida, und folglich ist nun erst der Zeitpunkt eingetreten, wo man die Abscisse ziehen darf.

§ 82. Der Blutdruck ist keine constante Grösse, sondern wechselt, in den Arterien wenigstens, nach Massgabe des Herzschlags, des Athmens und der Körperbewegung unaufhörlich. Verbindet man den Hämodynamometer mit einer Arterie, so schwankt das Quecksilber unaufhörlich auf und ab, und zwar entspricht die Zahl der Schwankungen in der Regel der Zahl der Pulse. Ferner fällt der Höhenstand dieser Wellenbewegung jedes Mal mit dem fühlbaren Pulse zusammen, so dass nicht der mindeste Zweifel sein kann, dass die Bergwelle eine Folge der Systole, die Thalwelle eine Folge der Diastole des Herzens sei.

Es kann kein günstiges Vorurtheil für Poisseuilles Beobachtungen erregen, dass er den Höhenstand des Quecksilbers auf die Exspiration, den Tiefenstand auf die Inspiration bezieht. Zwar stehen beide unter dem Einfluss des Athmens, aber der Rhythmus der Wellenbewegung hängt ausschliesslich vom Rhythmus des Herzschlags ab, und nur der Werth der positiven und negativen Wellen kann möglicher Weise durch das Athmen in-

fluenzirt werden, obschon auch ein solcher Einfluss nicht immer merklich ist.

Bei der Wichtigkeit, welche man in Deutschland den Untersuchungen Poisseuilles gegeben hat, und bei der Nothwendigkeit, in welcher ich mich befinde, den meisten seiner theoretischen Betrachtungen zu widersprechen, mag es erlaubt sein, ausführlicher nachzuweisen, dass die Höhen- und Tiefenstände des Quecksilbers, welche der französische Physiker vom Einflusse des Athmens ableitete, ebenfalls nur Pulsbewegungen waren.*) Poisseuille führte den Hämodynamometer in die Carotis eines Hundes ein und stellt die Resultate seiner Beobachtungen in folgender Tabelle zusammen.

	Quecksilberstand im aufsteigenden Schenkel des Instrumentes	
Beobachtung	während der Inspiration, angeblich.	während der Exspiration, angeblich.
1.	80 Millimeter	110 Millimeter
2.	90 »	100 »
3.	101 »	109 »
4.	110 »	115 »
5.	105 »	115 »
6.	110 »	115 »
7.	105 »	110 »
8.	100 »	115 »
9.	85 »	105 »
10.	95 »	100 »
11.	85 »	110 »

*) Ich bemerke, dass dieser Theil meiner Arbeit schon vor mehreren Jahren ausgearbeitet worden ist, früher, als *Ludwig* seine Pulscurven bekannt machte. Nach den Arbeiten meines Marburger Freundes kann von einer Verwechslung der Wellen des Pulses und der Respiration gar nicht mehr die Rede sein, so wenig, dass ein Theil der von mir gegebenen Nachweise überflüssig ist. Gleichwohl habe ich an meiner Darstellung nichts ändern wollen, um zu zeigen, dass schon mit den empirischen Mitteln, über welche *Poisseuille* verfügte, eine richtige Ansicht gewonnen werden konnte.

Es sollen also die Tiefenstände angeblich den Inspirationen und die Höhenstände den Exspirationen entsprochen haben, eine Angabe, welche, von einer gewissen Seite betrachtet, nichts Unwahrscheinliches hat. Beim Ausathmen wird der Brustkasten verengert, die grossen Gefässstämme werden gedrückt, und ein Druck auf diese lässt eine Steigerung des Blutdrucks erwarten.

Betrachtet man die Tabelle genauer, so findet sich eine doppelte Schwankung des Quecksilbers, nämlich einmal zeigen sich Unterschiede in den Zahlenwerthen der ersten und zweiten Columne während der Zeit einer Beobachtung. und dann wieder Unterschiede in den Druckwerthen verschiedener Beobachtungen in einer und derselben Columne.

Die flüchtigste Ueberlegung lehrt, und die Versuche des vorigen Abschnittes bestätigen, dass der Blutdruck während der Systole grösser sein müsse, als während der Diastole. Es müssen Oscillationen im Quecksilber vorkommen, welche ihren Grund in der pulsirenden Bewegung des Herzens haben, und man hat daher nur die Wahl übrig, ob man die differenten Druckwerthe einer und derselben Beobachtung, wie solche in den Columnen der Inspiration und Exspiration verzeichnet sind, oder vielmehr die Druckverschiedenheiten, welche für verschiedene Beobachtungen in derselben Columne vorkommen, auf den Einfluss des Pulses beziehen wollte. Offenbar ist nur die erste Annahme statthaft und folglich Poisseuilles Deutung unrichtig. Dies ergiebt sich aus Folgendem:

1) Die Zahl der Beobachtungen in der vorliegenden, wie in mehreren anderen von Poisseuille mitgetheilten Tabellen ist eine ungerade, was nicht sein dürfte, wenn die vom Pulse abhängigen Oscillationen in den verschiedenen Beobachtungen vermerkt wären.

2) Die in den verschiedenen Beobachtungen notirten Druckdifferenzen können auf den Puls nicht bezogen werden, da, wenn sie vom Pulse abhingen, ein Alterniren von Höhen- und Tiefenstand bemerklich sein müsste.

3) Poisseuille sagt von den Oscillationen der Quecksilbersäule ausdrücklich, dass die Bergwelle der Thalwelle unmittelbar *(immédiatement)* folge.*) Dies lässt sich nur auf die Pulswellen beziehen, welche rascher auf einander folgen als die Oscillationen, welche vom Athmen abhängen.

Die Wellenbewegungen des Quecksilbers im Hämodynamometer, desgleichen die Oscillationen des Blutes in meinem Manometer, sind also Wirkungen des Pulses, und der Einfluss des Athmens beschränkt sich darauf, die Höhe der Wellen unter Umständen zu steigern und unter anderen Umständen herabzudrücken.

Ich habe für angemessen erachtet, auf diesen Irrthum Poisseuilles ausdrücklich aufmerksam zu machen, da selbst physikalisch vorgebildete Physiologen sich in denselben haben verstricken lassen.**)

§ 83. Der Hämodynamometer ist ein Widerstandsmesser, und zwar misst derselbe nur einen Bruchtheil des im Gefässsysteme wirkenden Widerstandes, nie den ganzen. In diesem Bezuge liesse sich erstens bemerken, dass der Hämodynamometer streng genommen nur den Seitendruck S misst, und dieser ist geringer als der Widerstand, denn wir fanden $w = S + \varsigma$. Indess ist das Deficit, welches durch den Unterschied von Widerstand und Seitendruck veranlasst wird, wohl kaum bemerkenswerth. Wir werden später beweisen, dass der Werth $\frac{H}{w}$ im Blutsysteme nahezu $= 1$ ist, und bereits früher wurde erwiesen, dass ς um so geringfügiger wird, je mehr sich der unechte Bruch $\frac{H}{w}$ der Einheit nähert. Weit erheblicher ist der Umstand, dass der Druckmesser unter keinen Umständen unmittelbar am Anfange

*) *Brechet repertoire VI. p.* 75.

**) So leitet *Magendie* in seinen *leçons sur les phénomènes physiques de la vie* die erwähnten Oscillationen häufig vom Athmen ab, während er inconsequenter Weise sie an anderen Stellen auf den Puls bezieht.

des arteriellen Systems angebracht werden kann, sondern nur in einem vom Herzen mehr oder weniger entfernten Gefässe, also an einem Punkte, in welchem der Druck bereits eine Verminderung erfahren haben muss.

Freilich behauptet Poisseuille, dass der Blutdruck durch das ganze arterielle System bis in die kleinsten Zweige von gleicher Höhe sei, allein dieser Behauptung wird Niemand beitreten mögen, dem die physikalischen Verhältnisse des Kreislaufes hinreichend klar sind.*) Der Druck nimmt vom Ventrikel gegen das Atrium ab und muss abnehmen, denn er ist Folge der Widerstände, und die Widerstände nehmen in der angegebenen Richtung auch ab. Am Anfange der Aorte steht das Blut unter dem Einfluss aller Widerstandsmomente, welche in den Arterien, Haargefässen und Venen vorkommen, es muss also ein Druck statt finden, welcher die Totalität der Widerstandsursachen zu bewältigen vermag. Am Ende der Hohlvenen dagegen hat das Blut bereits alle Widerstände hinter sich, und indem seinem Eintritte in den Vorhof nichts hemmend entgegensteht, wird auch kein Druck statt finden, denn Druck giebt es nur in Folge von Widerstand. Zwischen dem Maximum des Drucks an der arteriellen Einflussmündung und dem Minimum des Drucks an der venösen Ausflussöffnung liegen zahllose Uebergangsstufen.

Wollte man nun den Beobachtungen Poisseuilles Glauben schenken, nach welchen der Druck im Arteriensysteme überall gleich ist, so müsste man zu der Vermuthung seine Zuflucht nehmen, der Widerstand entwickele sich im Wesentlichen nur in den Haargefässen und sei in den Arterien zu unbedeutend, um messbare Differenzen des Drucks zu begründen. Diese Annahme wird aber durch die im Vorhergehenden mitgetheilten

*) Wenn *Magendie* sagt: *Une molécule de sang dans l'artère carotide se meut avec la même force qu'une molécule de sang dans l'artère crurale,* so ist zweifelhaft, ob er den Irrthum seines Landsmannes theilte, oder seine Worte nur auf ein vereinzeltes und zufälliges Factum bezogen wissen wollte. *Leçons sur les phénomènes physiques de la vie III.* 56. *Bruxelles* 1838.

Untersuchungen und namentlich durch die Erfahrungen, welche in Capitel III niedergelegt wurden, vollkommen widerlegt.

Wir fanden $w = av^2 + bv$ oder mit Berücksichtigung der Gefässweite $w = \frac{m}{d} v^2 + \frac{n}{d^2} v$. Indem sich der Widerstand ungefähr umgekehrt wie der Durchmesser der Gefässe verhält, muss er in den Haargefässen allerdings sehr viel grösser als in den meisten Arterien sein, aber ganz unmöglich ist, dass er in dem ganzen Arteriensysteme bis in die kleinsten Gefässe *(les plus petits rameaux* nach Poisseuille) derselbe sei, zum Theil eben deshalb, weil der Durchmesser der kleinsten und grössten Arterien so sehr verschieden ist. Ferner steht aber der Widerstand nicht blos im Verhältniss zum Durchmesser, sondern ist auch Function der Geschwindigkeit. Er wächst proportional der Summe zweier Glieder, deren eines das Geschwindigkeitsquadrat, das andere die einfache Geschwindigkeit enthält. Wenn nun in den Haargefässen sehr viel mehr Widerstandsursachen durch die Verkleinerung der Diameter gegeben sind, als vergleichsweise in der Aorte, so ist umgekehrt in der Aorte sehr viel mehr Widerstand bedingt durch die grössere Geschwindigkeit des Blutstroms, als vergleichsweise in den Capillaren.

Ob nun in den grossen Gefässen oder in den kleinen mehr Widerstand entstehe, ist eher nicht zu entscheiden, als sich den allgemeinen Werthen der Formel bestimmte substituiren lassen. Setzen wir indess vorläufig, was der Wahrheit nahe kommt, der Widerstand verhalte sich umgekehrt wie der Durchmesser der Blutgefässe, so erhalten wir

$$w = \frac{mv^2 + nv}{d}$$

in welchem Falle die Geschwindigkeit mehr Einfluss auf den Druck ausüben würde als der Durchmesser. Nun ist zwar vorstehende Annahme nicht ganz richtig, aber da sie der Wahrheit, wie schon bemerkt, sehr nahe kommt, so kann darüber gar kein Zweifel sein, dass der Einfluss der weiten Gefässe auf den

Blutdruck sehr erheblich sein müsse. Die grossen Arterien und Venen, in welchen die Blutbewegung viel schneller vor sich geht als in den Capillaren, wirken mächtig auf den Druck durch den Factor der Geschwindigkeit.

Entwickelt aber ein weites Gefäss viel Widerstand, so folgt von selbst, dass zwei distante Punkte desselben sich durch ihre Widerstands- oder Druckhöhen auffällig unterscheiden müssen.

Hiermit ist der schlagendste Beweis gegen Poisseuille noch gar nicht zur Sprache gebracht.

Es ist eine physikalische Thatsache, dass ein Fluidum, welches durch Röhren fliesst, Widerstand finde und in Folge dieses Widerstandes Druck veranlasse, mögen die Röhren eng oder weit sein, und es ist ferner Thatsache, dass die Widerstandsmomente, welche in verschiedenen Abschnitten eines zusammenhängenden Röhrensystems statt finden, sich summiren und in jedem weiter aufwärts liegenden Abschnitte eine grössere Summe bilden.

Hieraus folgt, dass auch in den kleinsten Arterien, welche in die Capillaren übergehen, ein Widerstand und durch diesen ein Druck entstehe. Nennen wir diesen Druck z und den durch die Capillaren bedingten w, so ist die Summe des Drucks in den kleinsten Arterien $= z + w$. Bezeichnen wir ferner den in den mittleren Arterien veranlassten Druck mit y, so ist die Drucksumme in ihnen $= y + z + w$, und in den Arterienstämmen ist sie $= x + y + z + w$, wenn x den Druck bezeichnet, welcher im Bezirk der Schlagaderstämme, als Folge der in ihnen vorkommenden Widerstandsursachen, hervorgebracht wird.

Hieraus ergiebt sich, dass der Druck im Verlaufe der Arterien keinen constanten Werth haben könne, sondern abwärts vom Herzen mehr und mehr abnehmen müsse.

§ 84. Poisseuilles Beobachtungen, welche für das ganze Arteriensystem gleiche Druckwerthe ergeben, stehen zu der vorhergehenden Deduction in vollem Widerspruche. Es fragt sich

demnach, ob den Beobachtungen oder der theoretischen Beweisführung mehr Glauben zu schenken sei. Untersuchen wir also den Werth der Beobachtungen.

Um die Grösse des Blutdrucks an verschiedenen Punkten des Gefässsystems zu ermitteln, muss man mehrere Druckmesser in verschiedene Gefässe einführen und muss an denselben gleichzeitig beobachten, weil im Verlaufe der Zeit die Druckwerthe sich auffällig ändern. Die gleichzeitige Benutzung zweier Instrumente setzt die Thätigkeit zweier Beobachter voraus, und da diese nach den entgegengesetzten Seiten irren können, so ist der mögliche Beobachtungsfehler bei derartigen Untersuchungen schon aus dem angegebenen Grunde doppelt so gross als bei einfachen Hämodynamometerbeobachtungen.*)

An beiden Instrumenten muss der Höhenstand derselben, Systole, und der Tiefenstand derselben, Diastole, bestimmt werden, da nur diese vergleichbar sind. Der eine Beobachter muss also dem andern ein Zeichen geben, welche Welle zur Beobachtung kommen solle, und hierbei können Versehen um so leichter unterlaufen, als der Puls nicht vollkommen isochronisch ist, sondern in dem Gefässe, welches dem Herzen näher liegt, etwas früher auftritt als in dem entfernteren.

Die Möglichkeit von Irrungen wird ferner dadurch beträchtlich gesteigert, dass man genöthigt ist, die Mitteldrucke, d. h. die halbe Summe eines zusammengehörigen Höhen- und Tiefenstandes, zu suchen. Weder Höhenstände noch Tiefenstände sind unter sich vergleichbar, schon deshalb nicht, weil sie unter dem Einfluss der Friction stehen, welche in zwei Instrumenten nie ganz gleich sein wird, vor Allem aber deshalb nicht, weil, nach der Theorie der Wellenbewegung, die Höhenstände einerseits, wie die Tiefenstände andrerseits nur die zufällige Excursions-

*) Es bedarf der Bemerkung kaum, dass ich hier den Werth von Beobachtungen beleuchte, welche nach der Methode Poisseuilles mit einfachen Hämodynamometern angestellt sind.

weite der Wellen nach einer Seite anzeigen, nicht aber den Druck zu bezeichnen im Stande sind. Man muss also zur Bestimmung des Drucks den Höhen- und Tiefenstand einer und derselben Pulswelle messen, eine Aufgabe, welche gar nicht leicht ist. Wenn beispielsweise Poisseuille an einem Hunde experimentirte, dessen Herz in einer Minute 110 Mal pulsirte, so musste er in $\frac{1}{220}$ Minute einen Höhen- und einen Tiefenstand ablesen, da der Zeitraum, welcher Systole und Diastole trennt, nur $\frac{1}{2}$ Pulslänge dauert. Wer mit physikalischen Versuchen einigermassen vertraut ist, muss übersehen, dass unter solchen Umständen ziemlich bedeutende Beobachtungsfehler unvermeidlich sind, und wenn zwei Beobachter an verschiedenen Instrumenten observiren, so würde, selbst wenn der Druck in allen Arterien gleich wäre, demohngeachtet eine Gleichheit in den notirten Druckwerthen nur sehr selten zum Vorschein kommen können.

Eine absolute Gleichheit des Drucks in zwei Instrumenten, welche beispielsweise in die *carotis* und *cruralis* eingeführt sind, wäre endlich schon deshalb selten zu erwarten, weil, selbst wenn der hydrodynamische Druck in allen Arterien gleich wäre, doch der Druck der Schwere in ihnen fast immer ungleich sein würde. Ich meine Folgendes: Gesetzt, der Widerstand und der mit ihm verbundene Druck, welcher sich unter dem Einfluss der Bewegung entwickelt und welcher unter Anderem von der Weite der Gefässe abhängt, wäre aus gewissen, uns dunkel bleibenden Gründen in allen Arterien derselbe, während er, den physikalischen Constellationen zu Folge, abwärts vom Herzen immer geringer werden sollte, so müsste doch die Schwere des Blutes in tiefer liegenden Gefässen einen stärkeren Druck veranlassen als in höher liegenden. Nun ist nicht vorauszusetzen, dass es oft gelingen sollte, die beiden Arterien, in welche man die Hämodynamometer einführt, in absolut gleicher Höhe zu erhalten, es müssten sich also in den Druckwerthen verschiedener Instrumente wiederum Differenzen zeigen, Differenzen, welche zwar für den Beweis, dass der Widerstand in den Arterien allmälig abnehme,

sehr gleichgültig, aber für die Kritik der ganzen Lehre sehr wichtig sind.

Nach dem Mitgetheilten gereicht es der Arbeit Poisseuilles zur schlechten Empfehlung, dass er in Hunderten von Beobachtungen den Blutdruck in verschiedenen Arterien bis zu dem Werthe von $\frac{1}{100}$ Millimeter Quecksilber gleich fand! Diese Uebereinstimmung ist nahezu 1000 Mal grösser, als sie nach der Natur der Beobachtungen vorausgesetzt werden kann, und der geringste Vorwurf, welchen wir dem französischen Physiker machen müssen, ist der, dass er nach einem ihm plausiblen Prinzipe seine Beobachtungen corrigirte. Solche Beobachtungen beweisen nun freilich gar nichts.*)

§ 85. Viel gefährlicher für die von mir aufgestellte Theorie sind die Beobachtungen Spenglers. Nach den Erfahrungen dieses jungen Beobachters, welche übrigens dadurch an Wichtigkeit gewinnen, dass sie unter Mitwirkung Ludwigs gewonnen wurden, ist der Blutdruck in verschiedenen Gefässen sehr verschieden, und zwar in den vom Herzen entfernteren Arterien gewöhnlich grösser als in den näher liegenden. Spengler gesteht freimüthig ein, dass Beobachtungsfehler von 5—10 Millimeter Quecksilberhöhe in der Schätzung der Druckdifferenzen vorkommen können, aber er hat Fälle, wo die entlegene Arterie einen um 36 Millimeter höheren Druck zeigte als die nähere! Ich habe die Resultate sämmtlicher Versuche meines Vorgängers in der folgenden Tabelle zusammengedrängt, zu deren Verständniss ich nur zu bemerken habe, dass jeder in den Columnen aufgenommene Zahlenwerth die mittlere Summe aus 3 bis 4 Beobachtungen ist und den Druck einer Quecksilbersäule in Millimetern angiebt.

---

*) Aehnliche Einwürfe gegen Poisseuille hat schon Spengler a. a. O. pag. 18 geltend gemacht.

Tabelle

über den Blutdruck in verschiedenen Arterien des Pferdes.

Arterie	Höhenstand	Tiefenstand	Mitteldruck	Differenz
carotis	180,3	41,3	110,8	+ 20,5
maxillaris	156	106,6	131,3	
carotis	200,7	42,7	121,7	+ 31,8
a. metatarsi	154	153	153,5	
carotis	171	93,7	132,3	+ 3,9
a. metatarsi	140	132,5	166,2	
carotis	170	123,3	146,6	— 16,6
maxillaris	138,7	121,3	130	
carot. centralis	185,2	56	120,6	+ 3,6
carot. peripherica	149,5	99	124,2	

Mit Bezug auf den letzten Versuch ist zu bemerken, dass die Druckmesser in derselben Kopfschlagader eingeführt waren, der eine gegen das Herz hingerichtet, der andere gegen den Kopf hin. Der Druck in der peripherischen Seite der durchschnittenen Arterie konnte nur durch Anastomosen derselben mit der Carotis der entgegengesetzten Körperseite vermittelt werden, und diese Anastomose findet sich im *circulus arteriosus Willisii*. Demnach giebt der Versuch die Druckdifferenz zweier Punkte der Kopfschlagader, welche so weit von einander entfernt waren, als die dem Thiere beigebrachte Wunde am Halse oder, genauer genommen, als der Ursprung der *carotis* und die Schädelhöhle.

Von den 5 Beobachtungen, welche Spengler anstellte, entspricht nur die vierte den theoretischen Voraussetzungen. In den übrigen wächst der Druck abwärts vom Herzen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass nur die erste und zweite Beobachtung von Gewicht sind, in so fern in ihnen allein die Druckdifferenz so gross ist, dass sie ausserhalb der von Spengler be-

zeichneten Grenze der Beobachtungsfehler fällt. Ich werde auf die Würdigung dieser beiden Beobachtungen unten zurückkommen.

§ 86. Nach meinen Erfahrungen ist der Blutdruck in den grossen Arterien beträchtlicher als in den kleinen, und umgekehrt in den kleinen Venen bedeutender als in den grossen, also genau so, wie es den hydrodynamischen Gesetzen zu Folge erwartet werden musste.

Beobachtungen an einem grossen Fleischerhunde.

	Kopfschlagader.			Seitenast der Schenkelschlagader.		
Beobachtung	Höhenstand	Tiefenstand	Mitteldruck	Höhenstand	Tiefenstand	Mitteldruck
1.	194	174	184	180	178	179
2.	206	174	190	170	168	169
3.	194	174	184	170	168	169
4.	200	152	176	174	172	173
5.	200	146	173	174	172	173
6.	206	162	181	174	172	173
7.	206	158	182	178	176	177
8.	200	162	181	178	176	177
Mittel:	200	162,7	181,3	174,8	172,8	173,8
reducirt: *)	190	154,6	172,3	166,7	164,2	165,1

Im Mittel von 8 Beobachtungen war also der Blutdruck in der *carotis* um 7,2 Millimeter höher als in einem Aste der Schenkelarterie.

Beobachtungen an einem Kalbe.

Die Druckmesser wurden in der Kopfschlagader und der *arteria metatarsi* angebracht. Die Oscillationen des Quecksilbers in letzterer waren so überaus unbedeutend, dass Höhen- und Tiefenstände kaum unterschieden werden konnten und daher in folgender Tabelle nicht besonders bemerkt sind.

*) Diese Reduction bezieht sich auf Abzug des Drucks, welchen die Kalilösung veranlasst (§ 72).

	arteria carotis.			*arteria metatarsi.*
Beobachtung	Höhenstand	Tiefenstand	Mitteldruck	Mitteldruck
1.	140	126	133	94
2.	126	112	119	94
3.	130	118	124	94
4.	122	112	117	93
5.	132	122	127	93
6.	126	112	119	93
7.	136	122	129	95
8.	126	112	119	95
9.	112	104	108	95
10.	136	122	129	94
im Mittel:	128,6	116,2	122,4	94
reducirt auf:	122,2	110,4	116,3	89,3

Im Mittel von 10 Beobachtungen war also der Blutdruck in der Carotis um 27 Millimeter höher als in der *arteria metatarsi.*

Der Versuch wurde an einem andern Kalbe wiederholt, und nun ergab sich als mittlerer Werth des Drucks aus 12 Beobachtungen für die Kopfschlagader 165,5 Mm., für die *arteria metatarsi* 146 Mm., also eine Differenz von 19,5 zu Gunsten der ersteren.

Im vorhergehenden Paragraphen wurde gezeigt, wie die Frage, ob der Blutdruck abwärts vom Herzen abnehme, auch dadurch entschieden werden könne, dass man zwei Hämodynamometer in die entgegengesetzten Enden einer und derselben Arterie einführe. Solche Versuche habe ich in grosser Menge gemacht, und habe ohne Ausnahme gefunden, dass der Druck auf der Centralseite grösser ist als auf der peripherischen. Ich werde einige Beobachtungen der Art tabellarisch neben einander stellen und bemerke nur noch, dass jede aufgeführte Zahl ein Mittel aus mehreren, bisweilen vielen Beobachtungen ist.*)

*) Auch sind Tab. VII Fig. 1, 2, 3, 4, einige mit dem Kymographion gezogene Doppelcurven mitgetheilt, welche den isochronen Druck in der

Thierart	*carotis central.*	*carotis periph.*	Druckdifferenz
Kalb	134 Mm.	80,5 Mm.	53,5 Mm.
Kalb	135,5 »	94,5 »	41 »
Ziege	135 »	126 »	9 »
Böckchen	118 »	85 »	33 »
Kalb	177 »	151 »	26 »
Pferd	122 »	97 »	25 »
Kalb	145 »	108 »	37 »
Pferd	214 »	154 »	60,6 »

§ 87. Wenn meine Angaben über die Verhältnisse des Blutdrucks von denen Poisseuilles und Spenglers abweichen, so darf ich ein Gewicht darauf legen, dass wenigstens zum Theil meine Beobachtungen nach einer weit strengeren Methode angestellt sind, als die meiner Vorgänger, und dass diese strengeren Versuche vollkommen bestätigen, was ich schon aus den minder zuverlässigen gefolgert hatte.

Poisseuille und Spengler haben den Blutdruck nur mit dem Hämodynamometer gemessen, ich in vielen Fällen mit dem Kymographion. Die grossen Vorzüge des letzteren sind schon an einem anderen Orte entwickelt worden (§ 81). Ferner bestimmten die früheren Forscher den Mitteldruck dadurch, dass sie die Summen der Höhen- und Tiefenstände durch 2 dividirten, ein Verfahren, welches ich in meinen älteren Versuchen zwar auch benutzt habe, welches aber sehr unvollkommen und später von mir verbessert worden ist.

Ich bemerke erstens, dass diese Bestimmung des Mitteldrucks aus einem Dutzend derartiger Beobachtungen sehr wenig Gewähr

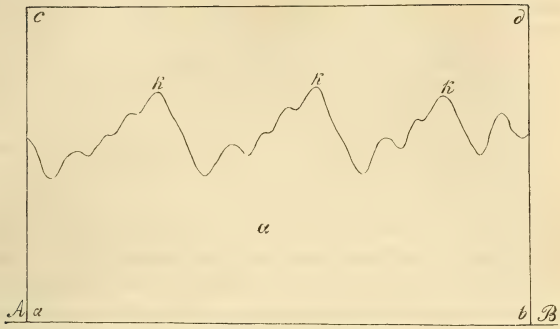
carotis centralis einerseits und der *carotis peripherica* andrerseits graphisch darstellen. Man hat sich zu denken, dass die beiden bezüglichen Curven über derselben Abscisse gezogen sind. Da nun im Kymographion wie im Hämodynamometer die aufsteigende Quecksilbersäule immer nur den halben Druck misst (vergl. § 72), so muss man die Distanz der beiden Curven verdoppeln und hiervon (mit Bezug auf die Natronlösung) $\frac{1}{12}$ der einfachen Distanz abziehn, um die wahre Druckdifferenz zwischen den beiden Gefässen zu erhalten.

leistet, dass er in einem nächsten Dutzend eben so würde ausgefallen sein. Die Messung des Höhen- und Tiefenstandes bezieht sich auf einen Druck von verschwindend kurzer Zeitdauer, und da der Druck im Laufe der Zeit ganz ausserordentlich und zwar stetig wechselt, so ist bei dem oben erwähnten Verfahren wenig Sicherheit gegeben, dass der Mitteldruck auch wirklich gefunden werde.

Fast noch wichtiger scheint mir, dass das Prinzip der Rechnung kein ganz richtiges ist. Nämlich das Mittel aus einem Höhen- und Tiefenstande kann nur bei sehr regelmässiger Wellenbildung dem Mitteldruck entsprechen, und die Pulswellen sind in vielen Fällen höchst unregelmässig, wie in einem späteren Abschnitte gezeigt werden wird.

Ich bediene mich daher seit einiger Zeit einer andern Methode zur Bestimmung des Mitteldrucks, welche einen hohen Grad von Genauigkeit gestattet. Ich spanne auf dem Cylinder des Kymographion einen Briefbogen auf, dessen Papierstärke von grösster Gleichmässigkeit ist, ziehe dann erst bei Nulldruck die Abscisse und lasse hierauf die Curve anschreiben.*) In beistehender Figur sei $A\ B$ die Abscisse und $k\ k\ k$ die Curve. Ist letztere gezeichnet, so nehme ich den Bogen vom Cylinder ab und fälle auf den Punkt a die Normale $c\ a$, desgleichen auf den Punkt b die Normale $d\ b$. Endlich wird $c\ d$ parallel $a\ b$ gezogen und die Grösse $c\ a = d\ b$ genau gemessen. Diese Grösse werde mit H bezeichnet.

*) Um sicher zu sein, dass das Papier eine ganz gleiche Stärke habe, schneide ich von demselben Bogen, auf welchen die Curve verzeichnet wird, verschiedene Stücke ab und wiege sie auf einer äusserst feinen Wage. Das Papier ist nur dann brauchbar, wenn die Gewichte dem quadratischen Inhalte der verschiedenen Stücke proportional sind.



Nach den erwähnten Vorbereitungen schneide ich das Rechteck *a b c d* mit der Scheere aus und wiege es. Das Gewicht desselben werde mit *G* bezeichnet. Weiter wird mit einer feinen Scheere die Curve genau ausgeschnitten und das zur Curve und Abscisse gehörige Stück *α* ebenfalls gewogen. Nennen wir das Gewicht dieses Stückes *g*, so sind wir im Stande, den Mitteldruck *h* durch Rechnung zu finden. Offenbar verhält sich $h : H = g : G$. Mit Hülfe dieser exacten Methode fand ich beispielsweise folgende Druckwerthe:

Kaninchen: *arteria carotis* 91,2; *arteria cruralis* 86 Mm.*)
Hund: *carotis central.* 113,8; *carotis periph.* 88,8 Mm.**)
Schaf: *carotis central.* 142,4; *carotis periph.* 116,7 Mm.
Schaf: *carotis central.* 88,4; *carotis periph.* 61,3 Mm.

§ 88. Die Frage, ob der Blutdruck in den Arterien abwärts vom Herzen allmälig abnehme, würde am vollständigsten erledigt werden, wenn man in einer und derselben Arterie mehrere Druckmesser anbringen und die Druckcurve beobachten könnte. Ein derartiger Versuch würde an vielen Schwierigkeiten scheitern, aber ich habe ein Experiment erdacht, welches nicht min-

*) Die zu diesen Beobachtungen gehörigen isochronen Curven sind Tab. VIII Fig. 2 abgebildet.

**) Vergl. die Abbildung der isochronen Curven Tab. VII Fig. 1.

der entscheidend ist. — Eine gebogene, 3 Millimeter weite Glasröhre von beistehender Form

wird mit ihren beiden Enden *a* und *d* in die durchschnittenen Enden eines Blutgefässes eingebracht und eingebunden. An 2 Punkten dieser Röhre, bei *b* und *c*, sind Druckmesser angebracht, entweder einfache Glasröhren von verticaler Stellung, wenn man an Venen operirt, oder Wellenzeichner nach der von Ludwig angegebenen Construction, wenn man Versuche mit Arterien macht. *) Gesetzt nun, das Blut fliesst in der Richtung von *abcd* durch die Röhre, so ist der Druck in *b*, d. h. in einem dem Herzen näher gelegenen Punkte, grösser als in *c*. Ist die Distanz der Druckmesser eine beträchtliche, z. B. 900 Millimeter, wie in meinem Instrumente, so ist die Seitendruckdifferenz nicht selten sehr ansehnlich. Dieselbe betrug:

Bei einem Kalbe 16,3 Mm. Quecksilberdruck = 220 Blutdruck **)
» » Hunde 10,5 » » = 140,7 » n. Aderl.
» » » 9,6 » » = 129,6 »

In der *vena jugularis* eines Hundes ergab sich in 3 Versuchen Folgendes:

	Grösse des Blutdrucks im Druckmesser *b*	im Druckmesser *c*	Druckdifferenz
1.	211 Mm.	125 Mm.	86 Mm.
2.	175 »	70 »	105 »
3.	180 »	70 »	110 »

*) In den Venen kann man deshalb offne Glasröhren ohne Unbequemlichkeit anwenden, weil der sehr geringe Blutdruck die Benutzung kurzer Druckmesser gestattet.

**) Vergl. die isochronen Curven Tab. VIII Fig. 5 und auf derselben Tafel Fig. 3 für den Hund und Fig. 4 für das Schaf.

wobei zu bemerken, dass sich die Zahlen im letzteren Falle auf den Druck einer Blutsäule beziehen.

Diese Versuche haben zwar in so fern keine absolute Gültigkeit, als das Blut hier nicht durch eine Ader, sondern durch eine Glasröhre fliesst, in welcher letzteren der Adhäsionscoëfficient möglicher Weise etwas grösser sein könnte als in ersterer, indess sind die Druckdifferenzen offenbar viel zu gross, als dass sie aus diesem Umstande allein abgeleitet werden dürften. Wird dies zugegeben, so liegt in den mitgetheilten Erfahrungen der unumstössliche Beweis, dass der Blutdruck im Gefässsysteme abwärts vom Herzen mehr und mehr abnehme.

Bei einigen Thieren habe ich Druckmesser an 4 verschiedenen Punkten des Gefässsystems angebracht, von welchen jeder vorhergehende dem Ventrikel näher lag als der nachfolgende. In der nachstehenden Tabelle bezeichne ich diese 4 Punkte mit *I*, *II*, *III*, *IV* und vergleiche den Druck mit dem einer Quecksilbersäule.

Grösse des Blutdrucks in verschiedenen Gefässen.

Thierart	I.	II.	III.	IV.
Ziege	*carot. centr.* 135	*carot. per.* 126	*vena facial.* 41	*vena jugul.* 18
Pferd	*carot. centr.* 122	*carot. per.* 97	kl. Halsvene 44	*vena jugul.* 21,5
Kalb	*carot. centr.* 165,5	*art. metatarsi* 146	*vena metatarsi* 27,5	*vena jugul.* 9

Ich darf nicht unerwähnt lassen, dass die Messung des Drucks in den Venen ein wenig früher ausgeführt wurde, als die in den Arterien, wodurch für die Beobachtungsfehler eine etwas grössere Breite entsteht.

§ 89. Die zahlreichen Beobachtungen, welche ich im Vorhergehenden mittheilte, stimmen sämmtlich darin überein, dass im Blutgefässsysteme, wie in todten Röhren, der hydrodynamische Druck von der Einflussmündung gegen die Ausflussmündung stetig abnimmt. Ich habe indess Fälle gesehn, welche zu diesem Gesetze nicht zu passen schienen, und es ist sonderbar, dass derartige Fälle mir durchaus nur bei Vergleichung des Drucks

in der Kopf- und Schenkelschlagader vorgekommen sind. Noch sonderbarer ist, dass sich der Druck in der Schenkelarterie fast ohne Ausnahme etwas grösser herausstellte als in der Kopfschlagader, wonach die Annahme von Zufälligkeiten, welche im Spiele gewesen, kaum zulässig scheint. Ich werde einige Fälle der Art mittheilen.*)

Höhe des Quecksilberstandes in Millimetern.

Thierart	*art. carotis*	*art. cruralis*	Durckdifferenz
Hund	122,5	124	+ 2,5
Hund	156,6	162,5	+ 5,9
Hund	157	163	+ 6
Hund	143	201	+ 58**)
Kalb	169,6	167,9	— 1,7
Kaninchen	91,2	86	— 5,2

Auch andre Versuche scheinen zu bestätigen, dass der Blutdruck in der Schenkelarterie gewöhnlich grösser sei als in der Kopfschlagader. Die Grösse des Blutdrucks in verschiedenen Gefässen wird nämlich indirect durch die Blutmenge gemessen, welche aus gleich weiten Oeffnungen in gleichen Zeiträumen abfliesst.***) Ich habe also in die durchschnittenen Enden der *arteria carotis* und *cruralis* Messingröhrchen von 2 Zoll Länge

*) Ein Fall, wo der Druck in der *carotis* grösser als in der *cruralis* war, beim Kaninchen, ist schon besprochen und abgebildet worden Tab. VIII Fig. 2. In einigen Fällen fand ich den Druck in beiden Gefässen fast gleich, wie auch durch isochrone Curven erläutert wird, Tab. VI Fig. 5 und Tab. VII Fig. 1. Beide Beobachtungen wurden an Hunden angestellt.

**) Diese Differenz fällt durch ihre Grösse stark aus der Reihe und lässt einen Beobachtungsfehler voraussetzen. Es ist dies eine meiner frühsten Beobachtungen aus dem Jahre 1841.

***) *Keil (Tentam. medico-phys.)* hat auch die Ausflussmenge des Blutes in verschiedenen Gefässen gemessen, aber ohne deren Weite zu berücksichtigen. In Folge diseer Vernachlässigung sind seine Versuche werthlos und die aus ihnen abgeleiteten Schlüsse unzulässig.

und 1 Linie Weite eingebunden und das gleichzeitig abfliessende Blut gesammelt und gewogen.

Versuche an einem 20 Kilogramm schweren Kalbe ergaben, dass in 45 Secunden aus der *carotis* 201 Gr., aus der *cruralis* 223 Gr. Blut abflossen. In einem zweiten Versuche an einem 30 Kilogramm schweren Kalbe entleerte die *carotis* in 20 Secunden 119 Gr., die Schenkelarterie 157 Gr. Blut.

Die hier mitgetheilten Fälle sind Ausnahmen, welche die Anwendbarkeit der hydrodynamischen Gesetze auf die Blutbewegung auf keinen Fall widerlegen können. In dem Abschnitte über die Bewegung der Flüssigkeiten durch verzweigte Röhrensysteme ist bereits nachgewiesen worden, dass die Abnahme des Seitendrucks von der Einflussmündung gegen die Ausflussmündung durch die Verhältnisse der Stauung Modificationen erleidet. Es giebt eine positive und eine negative Stauung, von denen erstere den Seitendruck über das normale Mass erhebt, letztere unter das normale Mass herabdrückt. In einem Röhrensysteme, welches sowohl positive als negative Stauung zulässt, muss also der Fall vorkommen können, dass ein Punkt, welcher der Einflussmündung näher liegt, einen ziemlich bedeutend geringeren Druck ausweist, als ein zweiter Punkt, welcher weiter abwärts, d. h. der Ausflussmündung näher gelegen ist. Wie weit derartige Abnormitäten im Gange der Druckcurve gehen können, ist vor der Hand nicht ausgemittelt, aber jeden Falls muss die stetige Abnahme des Blutdrucks im ganzen Verlaufe der Arterien, Haargefässe und Venen als Regel gelten.

§ 90. Es wird gegenwärtig schwerlich noch bezweifelt werden können, dass die Untersuchungen mit dem Hämodynamometer den Blutdruck nur theilweise, nicht aber vollständig messen. Wir haben erwiesen, dass der Druck abwärts vom Herzen stetig abnimmt, und da Messungen am Ursprunge der Aorte nicht ausführbar sind, so bleiben die Resultate derselben stets unter dem Maximum. Demnach bleibt vorläufig noch unentschieden, wie gross der Werth des Widerstandes im Ganzen

sei, dessen Erkenntniss gleichwohl für eine physikalische Behandlung des Kreislaufs so wichtig ist.

Bei Weitem die meisten Messungen sind an der *carotis* ausgeführt, man kann also fragen: wird in diesem Falle ein Druckwerth erhalten, welcher der Totalität der Widerstände einigermassen entspricht, oder findet auch hier eine erhebliche Unterschätzung statt? Gesetzt, wir benutzten zur Bestimmung des Drucks einen Hämodynamometer mit ⊤ förmiger Kanüle, so dass die Widerstandshöhe für den beprüften Punkt unmittelbar erhalten würde, so wäre zunächst zu fragen: wie liegt dieser Punkt im Verhältniss zur Einfluss- und Ausflussmündung des grossen Kreislaufs? Annäherungsweise würde dann das Instrument, wenn an der *carotis* operirt wird, in die Mitte zwischen dem Ventrikel und den Haargefässen zu liegen kommen, und da die rückführenden Gefässe eben so lang sind als die zuführenden, so würde der Abstand des Druckmessers vom Aortenursprunge etwa $\frac{1}{4}$ von der ganzen Länge der Blutbahn betragen, oder mit andern Worten, es würden etwa $\frac{3}{4}$ der ganzen Blutbahn unterhalb des Instrumentes liegen. Der Hämodynamometer misst also unter den gegebenen Voraussetzungen die Widerstände, welche sich in den letzten drei Viertheilen der Blutbahn entwickeln. Wenn nun die Druckhöhen, wie in den Versuchen mit einfachen Röhren von gleichmässigem Kaliber, sich genau wie die Länge der Gefässbahn verhielten, so würde der Widerstand durch solche Messungen an der *carotis* um $\frac{1}{4}$ unterschätzt.

Ich vermuthe, dass diese Auffassung der Wahrheit ziemlich nahe kommen wird. Denn wenn auch der Seitendruck bei der ungleichmässigen Weite der Gefässhöhle nicht im strengeren Sinne proportional der Länge dieser sich ändern, d. h. vom Vorhofe rückwärts gerechnet gegen die Herzkammer steigen kann, so ist doch wahrscheinlich, dass das mittlere Verhältniss der Steigung in dem einen Viertheil der Blutbahn ungefähr eben so ausfallen werde als in den übrigen drei Viertheilen.

§ 91. Poisseuille nahm an, dass bei allen Säugethieren, und

daher wahrscheinlich auch beim Menschen, der Blutdruck in den Arterien dem Drucke einer Quecksilbersäule von 160 Millimeter Höhe sehr nahe komme und als ein ungefährer Mittelwerth betrachtet werden dürfe. Ich glaube bewiesen zu haben, dass von einem mittleren Druckwerthe für verschiedene Arterien überhaupt nicht die Rede sein kann. Aber weiter ist zu sagen, dass auch in analogen Gefässen verschiedener Thiere, z. B. in der Kopfschlagader, der Blutdruck zu verschieden ausfällt, als dass die Grösse desselben beim Menschen mit hinreichender Wahrscheinlichkeit sich schätzen lasse. Ich habe eine grosse Menge von Versuchen über den Blutdruck in der *Arteria carotis* angestellt und werde, indem ich einen Ueberblick über dieselben gebe, auch einige Beobachtungen andrer Autoren mit aufnehmen.

Pferd	321	Millimeter,	nach Ludwig
Pferd	214	»	
Schaf	206	»	
Kalb	177	»	
grosser Hund	172	»	
Haushahn	171	»	
Schaf	169	»	
Hund	166	»	nach Spengler
Kalb	165	»	
Gans	162	»	nach Blake
Storch	161	»	
Taube	157	»	in der *arteria brachialis*
Hund	157	»	
Schaf	156	»	
Kalb	153	»	
Pferd	150	»	nach Spengler
Katze	150	»	nach Ludwig
Hund	143	»	
Ziege	135	»	
Kalb	133	»	
grosser Hund	123	»	

Pferd, alt und elend	122	Millimeter	
Böckchen	118	»	
Pferd, alt	110	»	nach Spengler
Kaninchen	108	»	nach Blake
Hund, jung	104	»	
Schaf, alt	98	»	
Kaninchen	90	»	
Henne	88	»	in der *a. brachial.*
Hecht*)	84	»	im Stamme der Kiemenschlagader
Barbe	42	»	eben daselbst
Hecht	35,5	»	eben daselbst
Frosch (113 Gr. schwer) . .	29	»	im linken Aortenbogen
Schildkröte**)	23	»	desgleichen
Frosch (114 Gr. schwer) . .	22	»	desgleichen
Wels**)	18,5	»	in einer Kiemenschlagader.

Aus diesen Beobachtungen ergiebt sich:

1) dass der Blutdruck in der *arteria carotis* verschiedener Säugethiere um mehr als das Dreifache seines Werthes schwanken könne.

2) Die warmblütigen Thiere scheinen einen weit höheren Blutdruck zu haben als die kaltblütigen.

3) Der Blutdruck in sehr jungen und sehr alten Thieren scheint geringer zu sein, als bei Individuen von einem mittleren Lebensalter.

---

*) Dieser für einen Fisch ausserordentlich hohe Blutdruck ist dadurch veranlasst, dass der Druckmesser mit einfacher Kanüle gleich unterhalb des *bulbus aortae* eingeführt war. Es wurde also der volle Werth *H* gemessen.

**) Das Thier hatte vor Einführung des Druckmessers einen kleinen Blutverlust erlitten.

4) Die Grösse der Thiere ist für die Stärke des Drucks durchaus nicht massgebend.

§ 92. Obgleich der Blutdruck bei verschiedenen warmblütigen Thieren zu grossen Schwankungen unterliegt, als dass man mit Poisseuille folgern könnte, er werde beim Menschen 160 Millimeter betragen, so ist doch zuzugeben, dass die Schwankungen sehr viel geringer sind, als man bei der verschiedenen Grösse und Kraft der Thiere hätte erwarten können. Das Herz eines Pferdes ist fast 1000 Mal grösser als das eines Hahnes, und doch ist der Blutdruck in der Kopfschlagader beider Thiere ungefähr derselbe.

Physikalisch betrachtet ist die Herzkraft das H in unsrer Gleichung: $H = f + w$, und es hat auf den ersten Anblick etwas Unverständliches, wie bei grossen Verschiedenheiten der Herzkraft (auf welche die enormen Verschiedenheiten der Muskelmassen hindeuten) der Werth von w so überaus geringen Schwankungen unterliegen könne. Nicht minder auffallend muss es scheinen, dass der Werth von w, welcher sich in directer Abhängigkeit von den Widerstandsursachen befindet, bei Thieren der verschiedensten Grösse sich gleich bleibt, da doch in einem grossen Thierkörper eine grössere Summe von Widerstandsursachen vorausgesetzt werden sollte.

Anlangend das letzte Bedenken, so ist dieses in einem früheren Abschnitte (§ 42) bereits beseitigt worden. Wir haben gesehn, dass in einem verzweigten Röhrensysteme die Vermehrung der Widerstandsursachen durch eine Vermehrung von Collateralzweigen compensirt werden könne. Es ist einleuchtend, dass in einem Pferde die Ausdehnung der Gefässwandungen, von welcher die Grösse der Adhäsion abhängt, überaus viel beträchtlicher sei als in einem Hahne, aber eben so unzweifelhaft ist, dass beim Pferde überaus viel mehr Wege gegeben sind, auf welchen das Blut aus den grossen arteriellen Stämmen in die grossen venösen übergehen könne. Die Vermehrung der Abzugskanäle erleichtert den Abfluss und vermindert also den

Widerstand. Wenn also ein Thier an Grösse zunimmt, so haben wir ein Moment, welches den Widerstand vermehrt, und ein zweites, welches ihn vermindert, woraus sich die Möglichkeit ergiebt, dass mit zunehmender Grösse des Körpers der Widerstand unverändert bleibe.

Was das andre Bedenken betrifft, dass ein grosses muskulöses Herz auf eine grosse Herzkraft und diese wieder auf einen grossen Widerstand schliessen lasse, so erledigt sich dasselbe durch folgende Betrachtung. Unstreitig hat das Herz eines Pferdes, welches 6 — 8 Kilogramm wiegt, mehr Muskelkraft als das Herz eines Hahnes, dessen Gewicht 15 — 20 Gr. beträgt, aber es bedarf auch dieser grösseren Kraft, um die ungleich grössere Blutmasse, die es enthält, in Bewegung zu setzen und in die arteriellen Stämme einzutreiben. Gesetzt, der Zuwachs an Kraft, welcher mit grösserer Entwickelung des Herzmuskels eintritt, wäre der vermehrten Blutmasse proportional, welche die geräumigeren Kammern enthalten und auszutreiben haben, so hätte diese Vermehrung der Kraft auf die Beschleunigung des Blutlaufs gar keinen Einfluss. Unter dieser Voraussetzung, welche nicht weit vom Wahren fallen kann, wäre die Geschwindigkeit der Blutbewegung von der Muskelstärke des Herzens nicht unmittelbar abhängig und könnte bei sehr kräftigen und sehr schwachen Herzen vollkommen dieselbe sein. Da nun der Widerstand eine Function der Geschwindigkeit ist, so ergiebt sich schliesslich, dass derselbe zwar zur statischen Kraft H, wie früher erwiesen wurde, nicht aber zur Muskelkraft des Herzens in einem gesetzlichen Verhältnisse stehe. *)

*) Man sieht hieraus, wie wichtig es ist, bei Schätzung der Herzkraft sich genau darüber zu verständigen, was mit diesem Namen bezeichnet werden solle. Die statische Kraft des Herzens ist bei verschiedenen Warmblütigen verhältnissmässig geringen Verschiedenheiten unterworfen, dagegen ist die mechanische Kraft desselben ganz ausserordentlich verschieden. Unter mechanischer Kraft verstehe ich das Product aus der Stromschnelle in die mittelst einer Systole entleerte Blutmasse. Die Stromschnelle scheint bei

Nach dem Vorausgeschickten steht die grosse Uebereinstimmung, welche die Werthe von w in verschiedenen Warmblütigen zeigen, mit den enormen Verschiedenheiten der Herzkräfte nicht in Widerspruch, wohl aber kann man sich wundern, warum die Natur die grössten wie die kleinsten Thiere warmblütiger Art so baute, dass der Blutstrom fast das gleiche Mass von Reibung entwickelte. Es muss von Wichtigkeit gewesen sein, den Grad des Blutdrucks bei warmblütigen Thieren in so enge Grenzen zu beschränken, nur lässt sich der Grund hiervon um so weniger übersehn, als für die kaltblütigen Wirbelthiere ganz andre Grenzen vorliegen.

Bedenkt man, dass der Blutdruck eine Function der Geschwindigkeit ist, so liegt die Annahme ziemlich nah, dass der geringe Druck bei den Amphibien und Fischen eine Folge trägerer Blutbewegung sei. Zu dieser Annahme passt auch die träge Ernährung dieser Thiere.

Cap. VI.

Von der Geschwindigkeit der Blutbewegung.

§ 93. Bei Untersuchung der Geschwindigkeit der Blutbewegung kann man entweder die Zeit suchen, welche das Blut zur Vollendung seines Kreislaufs braucht, oder man will bestimmen, wie gross der Raum sei, welchen ein Blutmolekül in einer bestimmten Zeit, z. B. in einer Secunde, zurücklege. In gegen-

den Säugethieren wiederum nur geringen Differenzen unterworfen zu sein, dagegen steht die entleerte Blutmasse in einem ziemlich constanten Verhältnisse zur Masse des Körpers. Hieraus folgt, dass die mechanische Kraft des Herzens bei den Säugethieren sich annäherungsweise wie ihre Körpermassen verhalte.

wärtigem Abschnitte handelt es sich um Erledigung der letzten Frage, wir suchen den Werth v, die Stromschnelle.

Da die Gefässhöhle an verschiedenen Stellen des Körpers von ungleicher Weite ist, so kann die Geschwindigkeit der Blutbewegung nicht überall gleich sein, vielmehr ist für jedes Gefäss die Stromschnelle besonders zu bestimmen, wodurch die Schwierigkeit der Untersuchung ausserordentlich gesteigert wird.

Die älteren Angaben über die Geschwindigkeit der Blutbewegung beruhen auf Schätzungen, welche zum Theil überaus unsicher, zum Theil prinzipiell falsch sind.

So hat man die Stromschnelle in der Aorte danach berechnet, dass man zunächst die Quantität Blut schätzte, welche die sich zusammenziehende linke Kammer austreibt, dass man dann die Weite der Aorte mass und die Länge des Raumes bestimmte, welcher durch das ausgestossene Herzblut erfüllt wurde. Hiermit erhielt man die Geschwindigkeit des Blutes für die Dauer einer Systole, also auch die mittlere Geschwindigkeit für die Dauer eines Pulses und endlich, wenn man die Frequenz des letzteren kannte, für die Dauer einer Secunde.

Dergleichen Schätzungen schwanken aber innerhalb so weiter Grenzen, dass sie als vollkommen werthlos betrachtet werden müssen.

Was erstens die Quantität des Blutes anlangt, welche im erwachsenen Menschen mit einer Systole entleert wird, so beträgt dieselbe nach Harvey: 0,5 Unze, nach Senac 1 ℥, nach Hamberger 2,25 ℥, nach Keil 1—2 ℥, Borelli 3 ℥, Haller 2 ℥, Prochaska 2 ℥, Krause 5,5 ℥, Valentin 5,3 ℥, Bergmann wenig über 1 ℥, Allen Thomson 1,5 ℥ u. s. w. Die Schätzungen differiren also um mehr als das Zehnfache.

Anlangend die Weite der Aorte, so beträgt dieselbe nach einer Messung Poisseuilles 908 □Millimeter, nach Vierort, im Mittel verschiedener Beobachtungen, 520 □Millim. Diese Angaben differiren wieder um das Doppelte, verdienen aber schon darum wenig Zutrauen, weil die Messungen am Leichnam, also

an Gefässen angestellt sind, welche sich nicht unter den natürlichen Druckverhältnissen befanden.

Berechnet man die Stromschnelle in der Aorte auf Grundlage dieser Schätzungen, so erhält man Resultate, welche um das Zwanzigfache von einander abweichen!

Gänzlich ins Nebelhafte verlieren sich die Rechnungen Keils, welcher die durch Gefässverzweigung bewirkte Verlangsamung der Stromschnelle auf constante Zahlenverhältnisse zurückführt und beispielsweise behauptet, dass die Geschwindigkeit des Blutes in der Aorte sich zu der eines 30 Mal verzweigten Gefässes wie 615 : 1, und zu der eines 40 Mal getheilten wie 5233 : 1 verhalte.

§ 94. Exacte Beobachtungen über die Geschwindigkeit der Blutbewegung kann man mit Hülfe des Mikroskops an durchsichtigen Theilen lebender Thiere, am Gekröse, an den Schwimmhäuten der Frösche, an den Kiemen der Frosch- und Salamanderlarven u. s. w. anstellen.

Man verfährt in der Weise, dass man den Blutlauf unter dem zusammengesetzten Mikroskope bei einer Vergrösserung betrachtet, welche gestattet die Blutkörperchen zu erkennen.

Im Ocular des Instrumentes muss ein Glasmikrometer angebracht sein, mit dessen Hülfe die Fortbewegung des Blutstroms im Raume bestimmt wird. Weiss man, welcher objectiven Grösse die Distanz zweier Theilungsstriche des Mikrometers entspricht, so kommt es nur darauf an zu untersuchen, wieviel Zeit ein Blutkörperchen braucht, um von einem Striche bis zum andern zu gelangen. Die Zeitbestimmung geschieht am bequemsten, wenn man sich eine Taschenuhr am Kopfe vor ein Ohr befestigt und darauf achtet, wieviel hörbare Schläge in den Zeitraum fallen, in welchem das Blutkörperchen seinen Weg vollendet. Bei den meisten Taschenuhren beträgt das Intervall zweier Schläge 0,2 Secunden, daher eine ziemlich genaue Schätzung der Geschwindigkeit von einem geübten Beobachter selbst dann

ausgeführt werden kann, wenn sich das Blutkörperchen nur durch eine sehr kurze Strecke mit den Augen verfolgen lässt.

Um das Resultat solcher Beobachtungen richtig zu würdigen, wird man zu berücksichtigen haben, dass der untersuchte Theil sich meistens in einer Lage befindet, in welcher eine gewisse Beeinträchtigung der Blutbewegung vorausgesetzt werden muss. Dies ist der Fall, wenn vorausgehende Blutverluste eine Schwächung des Herzens veranlassten; wenn die Circulation durch gewaltsames Binden der Thiere im Allgemeinen gehemmt ist; wenn die untersuchten Individuen ihrem natürlichen Elemente entzogen sind, z. B. Froschlarven oder Fische an der Luft untersucht werden; endlich auch, wenn häutige Theile, wie das Gekröse, in unnatürliche Lagen gebracht werden, wenn sie Falten bilden, u. s. w., lauter Umstände, bei welchen der Blutlauf gehemmt wird. Man ist also immer in Gefahr, die Geschwindigkeit des Blutlaufs zu unterschätzen, und von mehreren Beobachtungen über die Blutbewegung in Capillaren verdient in der Regel die am meisten Zutrauen, bei welcher das Blut die schnellste Bewegung zeigt.

E. H. Weber, welcher zuerst derartige Versuche an Froschlarven ausführte, fand in den Capillaren des Schwanzes, im Mittel von 17 Beobachtungen, eine Geschwindigkeit von 0,254 P. Linien = 0,573 Millimet. in 1 Secunde.*)

Valentin fand in den Capillaren der Schwimmhaut erwachsener Frösche eine mittlere Geschwindigkeit von 0,225 Par. Linien = 0,507 Millimeter in 1 Secunde.

Auch ich habe derartige Beobachtungen über die Blutgeschwindigkeit in Capillaren angestellt. Ich fand dieselbe in Kiemen von Salamanderlarven, im Mittel, = 0,245 Millimeter, im Schwanze der Froschlarven, im Mittel, = 0,4 Millimeter in 1 Secunde, in der Schwanzflosse eines kleinen Fisches = 0,12 Millimeter. Bei einem jungen Hunde wollte es nicht gelingen, die

*) Müllers Archiv für Anat. und Physiolog. 1838. S. 465.

Geschwindigkeit des Blutes in den Capillaren des Gekröses genau zu messen, indem die Athembewegungen störend eingriffen. Nach ungefährer Schätzung mochte die Geschwindigkeit doppelt so gross sein als bei den Froschlarven, also gegen 0,8 Millimeter.

§ 95. Um auch in undurchsichtigen Gefässen die Geschwindigkeit der Blutbewegung messen zu können, habe ich ein Instrument construirt, welches ich Hämodromometer nenne, und welches in seiner ersten, noch ziemlich unvollkommnen Bauart von einem meiner Assistenten beschrieben worden ist.*)

Mein Instrument besteht wesentlich aus einer langen, haarnadelförmig gebogenen Glasröhre, welche die Bestimmung hat, einem ausgeschnittenen Gefässsegmente substituirt zu werden. Die Glasröhre ist mit Wasser gefüllt, und das vom Herzen kommende Blut verdrängt dasselbe. Die eindringende Blutsäule verschiebt die vor ihr liegende Wassersäule, ohne dass die Fluida sich sonderlich mischen; sie braucht zum Durchfliessen des gemessnen Weges eine messbare Zeit, und man erhält hiermit die Unterlagen zu einer Berechnung, wie weit das Blut im Zeitraum einer Secunde sich fortbewege.

Diese vorläufigen Andeutungen werden die nun folgende Beschreibung des Instrumentes (vergl. Tab. III Fig. 1) verständlicher machen. Die Glasröhre, durch welche das Blut fliessen soll, hat keine freien Enden, welche sich mit denen eines Blutgefässes direct in Verbindung setzen liessen, sondern bildet einen schleifenartigen oder haarnadelförmigen Anhang einer sehr kurzen, an ihren Enden konisch zugespitzten Metallröhre, welche ihrerseits einem ausgeschnittenen Gefässstücke von nicht ganz zwei Zoll Länge substituirt wird. Man kann sich also vorstellen, es werde dem Blutstrome, durch Spaltung in zwei Arme, ein doppeltes Bett gegeben; der eine Arm ist gerade und äusserst kurz, der andre ist lang und in der Weise gebogen, dass An-

*) *Hüttenheim, F. A., observationes de sanguinis circulatione haemodromometri ope institutae. Halis Sax.* 1846.

fang und Ende desselben ganz nahe beisammen liegen. Wie nun in einem Strome, welcher sich theilt, durch Schleussen vermittelt werden kann, dass das Wasser bald durch den einen, bald durch den andern Arm seinen Weg nehme, so ist auch in meinem Instrumente durch zwei Hähne dafür gesorgt, dass das Blut nach Belieben des Experimentators immer nur durch den einen oder den andern Kanal hindurchströme.

In Tab. III Fig. 1 ist *A* die $1\frac{1}{2}$ Zoll lange Metallröhre, welche an ihren beiden Enden *a* und *a'* in der Weise konisch zugespitzt ist, dass ein Paar Kanülen, *k k'*, auf diese kegelförmigen Enden, wie Spritzenröhrchen an eine Injectionsspritze, fest aufgesteckt werden können. Im Verlaufe dieser Metallröhre sind zwei Hähne, *b b'*, angebracht, mit deren Hülfe man das *lumen* beliebig schliessen und öffnen kann. Nur der eine der beiden Hähne ist mit einem Handgriffe versehen; dreht man diesen einen, so dreht sich gleichzeitig auch der andere, indem beide auf der dem Handgriffe gegenüberliegenden Seite mittelst angebrachter Kammräder in einander greifen (Fig. 2 *r r'*).

Die mit den Hähnen versehene kurze Messingröhre giebt seitlich und unter rechten Winkeln zwei noch kürzere Arme ab, welche mit den Hähnen in gleichen Querschnitten liegen. Diese Seitenarme, *h h'*, sind nichts Anderes als Hülsen, welche die Enden der gebogenen Glasröhre aufnehmen, so dass zwischen dieser und der Messingröhre eine Verbindung hergestellt wird.

Die beiden Hähne, welche demnach genau an den Punkten liegen, wo das Strombett zuerst sich spaltet und dann wieder zusammenmündet, sind mit anderthalber Bohrung versehn. Man kann also die Hähne einmal so stellen, dass ihre ganze Bohrung in die Richtung der Messingröhre fällt (Fig. 3); dann ist diese natürlich durchgängig und die Glasröhre verschlossen; oder zweitens, man kann den Hähnen eine Stellung geben, bei welcher die halbe Bohrung in der Richtung der Messingröhre liegt (Fig. 4); dann ist diese abgesperrt, und die grosse Bahn durch die Glasröhre ist offen.

An der Rückseite des Instrumentes (Fig. 2), wo die Hähne mit Kammrädern in einander greifen, ist übrigens eine sogenannte Steurung angebracht (Fig. 2, *S*), welche die Drehung der Hähne bei 90° hemmt, also genau in dem Momente, wo die Bohrung des Hahnes mit dem Kanale α oder respective $\beta\beta'$, dem Zwecke des Experimentes entsprechend, zusammenfällt.

Die gebogene Glasröhre ruht auf einer metallenen Scala, deren Nullpunkt in der Axe der Messingröhre liegt, und welche den Nebenvortheil gewährt, das Instrument vor dem Zerbrechen zu schützen.

Soll nun der Hämodromometer benutzt werden, so legt man ein Gefäss in einer Strecke von mindestens 3 Zoll frei und schneidet, nachdem man durch Anlegung von Compressionspincetten die Circulation gehemmt, ein Stück von ungefähr 2 Zoll aus. In die offnen Enden des Gefässes werden die Kanülen *k k'* eingebunden. Diese Kanülen, deren eine gegen das Herz, die andre gegen die Haargefässe gerichtet ist, müssen dann soweit von einander liegen, dass sie an die kegelförmigen Enden der Messingröhre *a a'* bequem angesteckt werden können, ohne dass die Arterie aus ihrer geraden Richtung gebracht wird. Noch vor Einführung des Apparates in die Ader muss die Glasröhre mit Wasser gefüllt und der Handgriff des Hahnes so eingestellt werden, dass die Messingröhre durchgängig, die Glasröhre dagegen geschlossen ist, also in der Weise, wie Fig. 3 versinnlicht.

Gesetzt, das Instrument sei auf diese Weise in die *Carotis* eingeführt worden, so fliesst das Blut, nach Entfernung der Ligaturen oder der Compressionspincetten, vom Herzen durch die Messingröhre zum Kopfe, und die Circulation geht in der peripherischen Seite des Gefässes durchaus regelmässig von Statten. Ein einziger Moment reicht hin, dem Blute eine andre Bahn anzuweisen. Es fliesst nach Umdrehung des Hahnes durch die Glasröhre und verdrängt das hier befindliche Wasser in den peripherischen Theil des Gefässes. Durch die Kunst der Mechanik ist dieser Theil noch voll und leistet dem eindringenden

Wasser den normalen Widerstand, wovon das Gelingen des Experimentes abhing. Hätte der Kopftheil der *Carotis*, ehe die Glasröhre geöffnet wurde, sich entleeren können, so wäre das von hinten getriebene Wasser mit Gewalt ins Widerstandslose, und ebenso gewaltsam das treibende Blut ihm nachgestürzt. Die Schnelligkeit des Blutlaufs würde dann überschätzt worden sein. Zur richtigen Schätzung gehört noch, dass das *lumen* der künstlichen Blutbahn überall gleich weit und namentlich nicht weiter als die Oeffnung der in das Gefäss eingeführten Kanüle ist.

§ 96. Die Glasröhren meiner Instrumente haben eine Weite von 2—3 Millim. und eine Länge von 600—1300 Millim. gehabt, ohne dass diese Unterschiede einen bemerklichen Einfluss auf die Werthe der Geschwindigkeit gehabt hätten. Aber die langen Röhren sind deshalb zweckmässiger, weil das Blut längere Zeit braucht, um hindurchzusetzen, so dass die Fehler in der Zeitbestimmung geringer werden. Das Blut fliesst in wenigen Secunden selbst durch eine Röhre von 1300 Millim. Länge. Um eine so kurze Zeit mit Schärfe zu bestimmen, ist wiederum nöthig, eine Taschenuhr an ein Ohr zu befestigen und auf die Zahl der Schläge zu merken, welche das Blut braucht, um seinen Weg zu vollenden.*)

Am vortheilhaftesten verfährt man so, dass man in dem Momente, wo man den Hahn öffnet, Null zählt, und dann weiter, und dass man den Hahn schliesst, bei einem gewissen Uhrschlage, noch ehe das Blut in die undurchsichtige Messingröhre eintritt. Man findet auf diese Weise am genauesten die Länge des Weges, welchen der Blutstrom in einer gewissen Zeit, in 10, 20 u. s. f.

*) Die Dauer der Uhrschläge hat man natürlich vor dem Experimente zu ermitteln. Die meisten Taschenuhren machen in 1 Minute 300 — 304 Schläge oder 150 — 152 Doppelschläge. Die einfachen Schläge erfolgen zu rasch auf einander, um sich mit zwei- und dreisylbigen Zahlen zählen zu lassen, man muss sich daher an die Doppelschläge halten. Für meine Uhr beträgt die Dauer eines Doppelschlages 0,395 Secunden, also annäherungsweise 0,4″.

Uhrschlägen, zurückgelegt hat. Indess sind doch die Beobachtungsfehler, welche hierbei entstehen können, nicht ganz unbeträchtlich. Es entsteht nämlich allerdings eine gewisse Mischung des Blutes und des Wassers, und wie es an einer bestimmten Grenze zwischen beiden fehlt, wird die Schätzung des vom Blute zurückgelegten Weges ungenau. Da ziemlich wenig Blut dazu gehört, um dem Wasser eine sehr intensive Farbe zu geben, so habe ich bei meinen Messungen die Grenze immer an der Stelle genommen, wo die reine Blutfarbe auftrat, überzeugt, dass selbst an dieser Stelle das Wasser nicht ganz fehlte.

Die Strecke, in welcher Blut und Wasser evident sich mischen, hat manchmal eine Länge von 1 Decimeter, auch wohl etwas mehr. Beträgt der Weg, welchen das Blut zurückgelegt hat, 12 Decimeter, so könnte man sich im äussersten Falle bei Schätzung der Geschwindigkeit um $\frac{1}{10}$ verrechnen, wenn man das Factum der Mischung gar nicht in Anschlag brächte. Indess enthält die Stelle, wo die Mischung unzweifelhaft ist, schwerlich mehr als $\frac{1}{5}$ Blut, und auch da, wo keine Mischung bemerklich wird, befindet sich noch etwas Wasser. Rechnet man also die ganze Partie, wo Blut und Wasser sichtlich vermischt sind, als reines Wasser, dagegen die Partie, wo von Mischung nichts wahrnehmbar ist, als reines Blut, so wird man sich der Wahrheit so ziemlich nähern, und ich bin geneigt zu glauben, dass die auf diese Weise gefundenen Geschwindigkeiten bis auf $\frac{1}{25}$ ihres Werthes zuverlässig sein würden, wenn nicht leider noch eine zweite Quelle des Irrthums hinzukäme. Es ist nämlich nicht vorauszusetzen, dass das Oeffnen und Schliessen des Instrumentes vermittelst der Umdrehung des Hahnes präcis in dem Momente geschehe, in welchem es den abgezählten Uhrschlägen zu Folge geschehen sollte. Man kann sich bei Einstellung des Hahnes um $\frac{1}{2}$ Uhrschlag versehen, also, da diese Einstellung in jedem Experimente 2 Mal vorkommt, um 1 Uhrschlag, und das Blut der Arterien braucht in einigen Fällen nur 8 Uhrschläge, um das Instrument zu passiren. Hiernach würde der Beobach-

tungsfehler unter ungünstigen Umständen gegen $\frac{1}{5}$ betragen. Indess habe ich Ursache zu vermuthen, dass die wirklichen Beobachtungsfehler geringer ausfallen als die eben angegebnen möglichen. Ich habe bei ruhigen Thieren mehrere Male, in 3 auf einander folgenden Beobachtungen, genau dieselben Werthe für v erhalten, wonach bedeutende Irrthümer nicht zu erwarten sind.

§ 97. Man übersehe nicht, dass es sich im Vorhergehenden nur um die Fehler handelte, welche vorkommen können, wenn man die Schnelligkeit der Blutbewegung in der Röhre abschätzt.

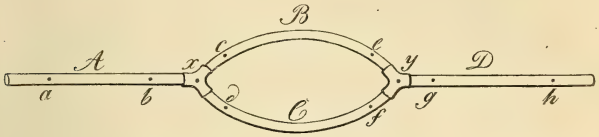
Eine ganz andere Frage ist, welchen Irrungen man ausgesetzt sei, wenn man annimmt, dass das Blut in der Glasröhre ebenso schnell fliesse als in der Arterie, in welche sie eingeführt wurde.

Aus der Beschreibung des Hämodromometers ergiebt sich, dass die Weite der Glasröhre geringer ist als die des Gefässes, mit welchem sie in Verbindung gebracht wird, folglich muss das Blut durch das Instrument schneller fliessen als durch das Gefäss, und es könnte hiernach scheinen, dass die gemessene Geschwindigkeit in jedem Falle einer mehr oder weniger bedeutenden Reduction bedürfe. Dem ist jedoch nicht so.

Die Frage, um welche es sich handelt, ist nicht die: Fliesst das Blut im Instrumente ebenso schnell als in der Arterie, in welche es eingeführt wurde? eine Frage, die offenbar verneint werden müsste, sondern die: Hat das Blut in dem Instrumente dieselbe Geschwindigkeit, welche es unter den natürlichen Bedingungen, d. h. vor Einführung des Hämodromometers, in dem Gefässe hatte?

Zur Beantwortung der letzteren Frage sind in einem vorhergehenden Abschnitte die vollständigen Unterlagen gegeben. Man hat zunächst zu erwägen, dass das Gefässsegment, welchem die dünnere Glasröhre substituirt wird, nichts Anderes als ein Arm eines vielfach verzweigten Gefässsystems ist, und hat daran die Frage zu knüpfen, welchen Einfluss eine derartige Substitution auf das Fliessen habe.

Nun sei beistehende Figur das Schema eines Gefässsystems, welches der bequemeren Darstellung wegen nur aus 4 gleich langen und gleich weiten Elementen *A B C D* bestehen mag, und *B* sei der Arm, welchem die engere Röhre des Hämodromometers zwischen *ce* zu substituiren wäre.



Man frage sich zuerst, was wird geschehen, wenn bei unveränderter Fallhöhe oder Herzkraft der Röhre *ce* eine engere substituirt wird? Natürlich muss der Abfluss vermindert, also auch die Geschwindigkeit verringert werden. Das Blut fliesst nach Einführung der engen Röhre langsamer durch *B* als vorher. Zwar fliesst es durch die verengte Stelle *ce* schneller als durch die nicht verengte, aber unmöglich kann es durch die verengte Stelle schneller fliessen, als es durch *B* floss, noch ehe die Verengerung angebracht worden war. Im Gegentheil muss es durch die verengte Strecke langsamer fliessen als vordem, weil in der Verminderung der Röhrenweite ein hemmendes Moment liegt. Man braucht übrigens nur auf dem andern Collateralarme, *C*, eine Strecke *df* im Gedanken abzustecken, welche ebenso lang als *ce*, aber nicht verengert ist, und sich zu fragen, wird die Stromschnelle in dem weiteren Abschnitte *df* oder in dem engeren *ce* geringer sein? so wird man sich, mit Berücksichtigung oben mitgetheilter Erfahrungen (§ 37), für den letzteren Fall entscheiden müssen. Die Stromschnelle ist in dem verengten Abschnitte *ce* geringer als in *df*, sie ist ferner in *df* gegenwärtig geringer, als sie ebendaselbst war, ehe durch Verengerung des Collateralarmes ein neues Hemmniss geschaffen wurde, folglich ist die Geschwindigkeit in dem verengerten Abschnitte *ce* auch geringer, als sie in dem Abschnitte *df* war, noch ehe der Appa-

rat durch Substitution der engeren Röhre in *B* modificirt wurde. Vor dieser Substitution war aber die Geschwindigkeit in *B* ebenso gross als in *C*, und folglich hat die Geschwindigkeit in *B* nach jener Substitution nicht nur im Allgemeinen, sondern auch in der verengten Stelle *ce* im Besonderen abgenommen. Die Richtigkeit dieser Betrachtungen hat sich durch die Versuche vollkommen bestätigt.

In einem Falle bestand der oben abgebildete Apparat aus vier Röhren von 500 Millim. Länge und 7,03 Millim. Durchmesser. Bei einer Fallhöhe von 382 Millim. ergab sich die Stromschnelle in $A = 893$ Millim., und folglich musste sie in den Röhren *B* und $C = 466{,}5$ Millimeter sein.

In einem zweiten Falle waren die Bedingungen vollkommen dieselben, nur war statt der Röhre *B* von 7,03 Millim. Durchmesser eine engere von 3,5 Millim. Diameter eingeführt. Nun ergab sich bei 893 Millim. Fallhöhe in *A* eine Geschwindigkeit von 806,7 Millim., in *B* aber von 340,4 Millim.

Die der weiteren Röhre substituirte engere hat demnach die Geschwindigkeit nicht vergrössert, sondern annäherungsweise um $\frac{1}{4}$ verlangsamt.*)

Das Blut fliesst also durch den Hämodromometer zu langsam, nicht aber zu schnell, wie es von vorn herein den Anschein hatte.

§ 98. Es bliebe nur die Frage zu erörtern, ob die Verlangsamung, welche der Blutstrom im Hämodromometer erfährt, eine derartige sei, dass die Ergebnisse der Messungen durch sie wesentlich betheiligt werden.

Man substituirt im Experimente einem kurzen, weiten und

*) Man wird hieraus nicht folgern wollen, dass auch der Hämodromometer eine beträchtliche Verlangsamung der Blutbewegung veranlasse. In dem eben erörterten Falle wird durch Substitution der engen Rohre für die weite das Mass der Widerstandsursachen ausserordentlich gesteigert, was bei Einführung des Hämodromometers in die Blutgefässsysteme nicht der Fall ist.

geraden Gefässsegmente eine lange, engere und mit mehreren Winkeln versehene Röhre und setzt hierdurch eine beträchtliche Menge neuer Widerstandsmomente. Wenn alle diese Widerstandsmomente ausschliesslich auf das Gefäss wirkten, in welches der Hämodromometer eingeführt wird, so müsste die Geschwindigkeit der Blutbewegung ausserordentlich gehemmt werden, indess kann eine solche örtliche Einwirkung nicht statt finden. Vielmehr vertheilt sich in Flüssigkeiten jede Einwirkung gleichmässig nach allen Seiten, und so auch die Einwirkung der Widerstandsursachen in den communicirenden Abtheilungen des Gefässsystems. Wie nun der Widerstand, welchen das Messinstrument mit sich bringt, über das ganze System gleichmässig vertheilt wird, so wird auch die Geschwindigkeit nicht in einem Gefässe, sondern in allen geschwächt, und durch die Vertheilung des schwächenden Einflusses wird die Grösse desselben an jedem einzelnen Punkte geringer.

Die Frage reducirt sich daher darauf, ob der Zuschuss von Widerstand, welchen das Instrument mit sich bringt, im Vergleich zu der Summe der Widerstände, welche im normalen Zustande schon vorhanden ist, von wesentlichem Belang sei. Dies wird man nicht wahrscheinlich finden, wenn man die tausend und aber tausend Widerstandsursachen überschlägt, welche in einem Thierkörper der Bewegung des Blutes entgegentreten.

Offenbar sind die Hindernisse, welche der Hämodromometer der Blutbewegung bereitet, viel geringer als diejenigen, welche aus der Unterbindung einer Gefässbahn hervorgehen. Nun lehrt aber die Erfahrung, dass der Blutdruck, welcher erwiesener Massen den Hindernissen proportional ist, durch Unterbindung eines Gefässes nur wenig gesteigert wird, und folglich kann die Steigerung des Widerstandes, welche durch Einführung meines Instrumentes veranlasst wird, nur sehr geringfügig sein.

Hätte mein Instrument durch Vergrösserung der Adhäsionsfläche einen merklichen Einfluss auf Verlangsamung der Stromschnelle, so müsste ein Hämodromometer mit langer Glasröhre

eine langsamere Blutbewegung ergeben, als ein Hämodromometer mit kurzer. Zahlreiche Beobachtungen haben einen derartigen Einfluss der Länge nicht wahrnehmen lassen. Hierzu kommt noch, dass das Blut durch die Glasröhre so rasch durchströmt, dass die Annahme einer irgend erheblichen Verlangsamung geradezu unmöglich ist. Die Geschwindigkeit der Strömung ist nämlich bedingt durch die von den Herzkammern entleerte Blutmenge, und diese wieder hat ihre Grenzen in der Capacität der Ventrikel. Je schneller das Blut fliesst, um so mehr muss mit jeder Systole entleert werden, und ich werde zeigen, dass die von mir gefundenen Geschwindigkeiten bereits sehr ansehnliche Capacitäten der Ventrikel voraussetzen, nämlich Weiten, welche das Maximum aller bisher gemachten Messungen noch um etwas übertreffen.

§ 99. Ehe ich zu Einzelnheiten der Beobachtung übergehe, werde ich noch einige Bemerkungen über den Gebrauch des Hämodromometers nachtragen.

Unmittelbar nach Vollendung einer Beobachtung entfernt man das Instrument und reinigt es, ehe das in ihm befindliche Blut zur Gerinnung kommt. Die Reinigung, wie auch die erste Füllung mit Wasser, geschieht mit Hülfe einer kleinen Spritze, deren vordere Ausflussöffnung sich trichterförmig erweitert und so weit ist, dass die konisch gearbeiteten Enden des Hämodromometers (Tab. I Fig. 1 *aa'*) genau hineinpassen. Nachdem man die mit Wasser gefüllte Spritze an den Hämodromometer gesteckt und den Hähnen eine solche Stellung gegeben, dass die Glasröhre durchgängig ist, spritzt man Wasser durch das Instrument. Die Reinigung gelingt weniger, wenn man den Spritzenstempel gleichmässig vorwärts stösst, als wenn man ihn ruckweise auf und ab bewegt. Auch ist vortheilhaft, wenn bei dieser Arbeit etwas Luft in die Glasröhre getrieben wird. Reicht dies Alles nicht aus, so muss man Essigsäure durch das Instrument spritzen.

§ 100. In nachstehender Tabelle findet man eine Anzahl von Beobachtungen über die Geschwindigkeit des Blutes.

Geschwindigkeit des Blutstroms in verschiedenen Säugethieren.

Versuch	Thierart	Name des Blutgefässes	Werth von v in Millimet.	Bemerkungen
1.	Hund	*art. carotis*	273	
2.	Hund	desgl.	262	
3.	Hund	desgl.	357	
4.	Hund	desgl.	329	... Mittel aus 3 sehr übereinstimmenden Beobachtungen.
5.	Hund	desgl.	280	
6.	Hund	desgl.	338	
7.	Hund	desgl.	205	
8.	Ziege	desgl.	358	
9.	junge Ziege	desgl.	280	
10.	junge Ziege	desgl.	240	
11.	Pferd	desgl.	254	
12.	Pferd	*art. metatarsi*	56	
13.	Pferd	» *maxillar.*	232	
14.	dasselbe	» *carotis*	306	... Nach Unterbindung der *art. maxillaris.*
15.	Pferd	» *maxillar.*	99	
16.	dasselbe	» *carotis*	431	... Nach Unterbindung der *art. maxillaris.*
17.	Pferd	desgl.	220	... Mittel aus 4 Beobachtungen.
18.	Kalb	desgl.	431	
19.	Schaf	desgl.	287	
20.	Schaf	desgl.	241	
21.	dsgl. später	desgl.	281	
22.	Schaf	desgl.	350	... Mittel aus 3 Beobachtungen.
23.	Hund	*vena jugul.*	225	... Mittel aus 3 Beobachtungen.

Aus diesen Beobachtungen ergiebt sich Folgendes:

1) Die Geschwindigkeit der Blutbewegung in den grossen Arterien und Venen ist enorm viel grösser als die in den Haargefässen beobachtete (§ 94).

2) Die Stromschnelle ist in den Arterien, welche dem Herzen näher liegen, grösser als in den entfernter liegenden.

3) Die Geschwindigkeit des Blutes in analogen Gefässen, z. B. in den Carotiden verschiedener Säuger, ist zwar nicht gleich, aber auch nicht auffallend verschieden, d. h. die Differenzen bei verschiedenen Thierarten sind kaum grösser als die bei verschiedenen Individuen gleicher Art.

4) Als ungefähre Mittelzahl für die Geschwindigkeit des Blutes in der Kopfschlagader der bis jetzt untersuchten Säugethiere dürften 300 Millim. anzunehmen sein.*)

§ 101. Einen auffallenden Einfluss auf die Geschwindigkeit haben Blutverluste. In der Regel wird mit jedem Aderlasse die Blutbewegung langsamer, doch kommen Ausnahmen vor, welche wenig befremden können, wenn man erwägt, dass die Herzkraft unter dem Einflusse sehr verschiedener Bedingungen steht. Ich werde einige Beobachtungen im Einzelnen mittheilen, wobei ich bemerke, dass dieselben ohne Ausnahme an der Kopfschlagader angestellt wurden.

Die erste Versuchsreihe wurde an einem Kalbe in der Weise angestellt, dass ich eine Glasröhre von 1,3 Meter Länge und 7 Mill. Durchmesser in die *Carotis* einführte und bestimmte, wie

*) Die Geschwindigkeit ist geringer als die a. a. O. von Hüttenheim erlangte, was einer Erklärung bedarf. Hüttenheim experimentirte mit einem Hämodromometer von unvollkommner Bauart. Die Hähne zum Oeffnen und Schliessen der Röhre griffen nicht in einander und mussten mit der rechten und linken Hand jeder einzeln gedreht werden. Man darf annehmen, dass die Oeffnung beider kaum je absolut gleichzeitig erfolgte, womit dann zusammenhängt, dass der peripherische Theil des Blutgefässes sich entleeren konnte, ehe noch die Blutbewegung durch die Glasröhre ihren Anfang nahm. Wenn nun nach Oeffnung auch des zweiten Hahnes das Blut in der Glasröhre mobil wurde, so fand es im peripherischen Theile des Gefässsystems zu wenig Widerstand und floss demnach schneller.

viel Blut in Zeit von 60 Uhrschlägen (zu 0,4″) abfloss. Mit jeder neuen Beobachtung steigerte sich demnach der Blutverlust, aber mit jeder neuen Beobachtung verminderte sich auch die Quantität des Abflusses, welche der Stromschnelle proportional sein musste.

Versuche am Kalbe.

1. Beobachtung	Blutabfluss in 24 Secunden	= 141,6	Gramm.
2. »	. . . . .	= 129,8	»
3. »	. . . . .	= 97,1	»
4. »	. . . . .	= 97,7	»
5. »	. . . . .	= 88,9	»
6. »	. . . . .	= 58,3	»
7. »	. . . . .	= 44,8	»

Die vierte Beobachtung ist die einzige, welche aus der Reihe fällt. In den beiden folgenden Versuchsreihen wurde die Geschwindigkeit mit dem Hämodromometer bestimmt.

Versuche an einem Hunde.

Beobachtung	Grösse des Blutverlustes im Ganzen	Geschwindigkeit des Blutes
1. »	. . . . 0	280 Mill.
2. »	. . . . 54 Gramm.	259 »
3. »	. . . . 133 »	186,6 »
4. »	. . . . 219,5 »	88,4 »
5. »	. . . . 295,5 »	48 »

Versuche an einem Pferde.

Beobachtung	Grösse des Blutverlustes im Ganzen	Geschwindigkeit	Pulsfrequenz in 1 Minute
1.	0	431 Mill.	56
2.	680 Gramm.	383 »	68
3.	2040 »	345 »	64
4.	3400 »	383 »	74

Beobachtung	Grösse des Blut-verlustes im Ganzen	Geschwindigkeit	Pulsfrequenz in 1 Minute
5.	5440 Gramm.	431 Mill.	76
6.	6800 »	287 »	100
7.	8160 »	287 »	110
8.	9740 »	287 »	120
9.	11780 »	157 »	160
10.	13820 »	150 »	152

In dieser Versuchsreihe kommen Fälle vor, wo der Blutverlust die Stromschnelle nicht nur nicht vermindert, sondern sogar steigert. Dies kann theilweise an der Mangelhaftigkeit des Experimentes liegen, welches zu den ersten gehört, die ich mit dem Hämodromometer angestellt habe, aber gewiss ist die Ungenauigkeit der Versuche nicht der einzige Grund der vorkommenden Unregelmässigkeiten. Ich bin vielmehr geneigt anzunehmen, dass die Geschwindigkeit der Blutbewegung eine Resultante verschiedener Bedingungen ist, von welchen einige zu unabhängig vom Blute dastehen, um durch quantitative Veränderung desselben augenblicklich und nach einer bestimmten Seite getrieben zu werden. Immerhin ist das Resultat dieser Versuchsreihe am Pferde im Ganzen genommen auch dieses, dass Blutverluste die Circulation verlangsamen.

Der Grund, warum Blutentziehungen in der Regel sofort die Stromschnelle vermindern, liegt unstreitig in der Verengerung und in der Erschlaffung der Gefässe, denn an eine Schwächung des Herzens, dem durch die Blutverluste der Nahrungsstoff verkümmert wird, ist bei dem plötzlichen Eintreten der Wirkung nicht wohl zu denken.

Wenn nun Blutverluste die Stromschnelle aus dem angegebenen Grunde vermindern, so scheint direct zu folgen, dass Vermehrung der Blutmasse sie steigern müsse. Dies wird auch bis zu einem gewissen Punkte sicherlich geschehen, nur wird die Zunahme der Geschwindigkeit ihre Grenze haben, denn es wird

endlich dahin kommen, dass die Herzkraft der Bewegung zu grosser Massen nicht mehr gewachsen ist.

§ 102. Ziemlich weit verbreitet ist die Annahme, dass mit zunehmender Häufigkeit des Pulses die Geschwindigkeit der Blutbewegung wachse. Dass dieser Satz keine allgemeine Gültigkeit habe, lehrt die letzte Versuchsreihe, aus welcher sich ergiebt, dass in Folge von Blutverlusten die Pulsfrequenz zunehmen und die Stromschnelle abnehmen könne. Indess erlauben diese Erfahrungen keine Folgerung auf die Fälle, wo die Pulsfrequenz zunimmt, während die Blutmenge dieselbe bleibt.

Eine, wie mich dünkt, sehr rationelle Betrachtung lehrt, dass Veränderung der Pulsfrequenz ohne Mitwirkung gewisser, noch näher zu ermittelnder Nebenumstände auf die Geschwindigkeit der Blutbewegung durchaus keinen Einfluss haben könne.

Gesetzt, das Herz pulsirte in 1 Minute 60 Mal, entleerte mit jeder Systole 200 Gramm. und erfüllte mit diesem Blutquantum eine Strecke von 400 Millim. der Aorte, so wäre die Stromschnelle in 1 Secunde eben 400 Millimeter. Es fragt sich, wie gross wird die Geschwindigkeit sein, wenn sich die Pulsfrequenz verdoppelt? Würde das Herz auch jetzt mit jeder Systole 200 Gramm. Blut entleeren, so würde es in $\frac{1}{2}$ Secunde eine Strecke der Aorte von 400 Millimet. Länge erfüllen, und die Geschwindigkeit würde verdoppelt werden.

Die Frage, wie schnell das Blut fliesst, hängt also von der Frage ab, wie viel der Ventrikel entleert. Der Ventrikel entleert aber nicht mehr, als er von der Vorkammer empfängt, und die Vorkammer kann nicht mehr abgeben, als sie selbst empfangen hat. Kehren wir zu dem ersten Fall zurück, wo der Ventrikel in jeder Secunde 200 Gramm. entleert, so ist klar, dass die Vorkammer ihm in jeder Secunde auch 200 Gramm. ersetzt, und weiter kann die Vorkammer nur 200 Gramm. abgeben, weil sie selbst von den Venen ebenso viel erhalten hat. Wenn nun das Herz, statt in Intervallen von Secunden, in Intervallen von halben Secunden pulsirt, so entleert der Vorhof, was er in einer halben

Secunde erhalten hat, d. h. 100 Gramm. statt 200; und da der Ventrikel nicht mehr entleeren kann, als er empfängt, so entleert er mit 2 Pulsen 2×100 Gramm. $= 200$, d. h. bei 120 Schlägen in 1 Minute genau soviel, als er vorher bei 60 Schlägen entleerte.

Die Beschleunigung des Pulses würde also die Geschwindigkeit der Blutbewegung nicht steigern, wenn die mit derselben verbundene Verkürzung der Diastole eine entsprechend geringere Füllung zunächst des Vorhofes und dann des Ventrikels zur Folge haben sollte. Ob dem so sei oder nicht, kann meines Erachtens nur durch unmittelbare Erfahrung entschieden werden.

Vielleicht könnten Einige glauben, dass hierher gehörige Erfahrungen im Vorhergehenden schon enthalten wären. In meinen Versuchen über Wellenbewegung in elastischen Schläuchen fand sich constant, dass die Stromschnelle mit Vermehrung des Pulses abnahm (§ 59). Indess wird man bei näherer Erwägung finden, dass jene Versuche für die Verhältnisse des Kreislaufes nicht massgebend sein können.

Nach § 46 stellte ich die gedachten Versuche an einem Darme an, welcher durch einen Wasserbehälter, bei unveränderlicher Fallhöhe, gespeist wurde. Der Darm war mit dem Behälter durch eine Messingröhre verbunden, in welcher ein Hahn angebracht war, und durch abwechselndes Oeffnen und Schliessen desselben wurde die pulsirende Bewegung des Herzens nachgeahmt. Unter diesen Verhältnissen war eine Vermehrung der Stromschnelle durch Beschleunigung des Pulses schlechthin unmöglich, denn die Geschwindigkeit hing in der Hauptsache von der Fallhöhe ab, welche ihrerseits vom Rhythmus des Pulses ganz unabhängig war. Hatte Beschleunigung der Pulse, d. h. häufiges Oeffnen und Schliessen des Hahnes, eine Verminderung im Wasserabfluss zur Folge, so lag dies wohl nur daran, dass, je öfter der Hahn in einer gegebnen Zeit geschlossen wurde, um so öfter der an sich constante Druck der Wassermasse, von welchem die Bewegung ausging, unterbrochen werden musste.

Die Frage, ob Vermehrung der Pulsfrequenz die Blutbewegung beschleunige oder verlangsame, muss durch Beobachtungen am Thiere selbst entschieden werden. Solche Beobachtungen besitzen wir noch nicht in genügendem Umfange, indess ist sehr wahrscheinlich, dass die Geschwindigkeit der Bewegung bei zunehmender Beschleunigung des Pulses eine Zeit lang steige und dann wieder sinke.

Viele Beobachter haben gesehn, dass bei Winterschläfern, bei erstarrten Fröschen u. s. w., der Kreislauf eben so träge als der Puls ist, und dass mit zunehmender Lebendigkeit des Herzens auch die Blutbewegung rascher wird. Auch an Froschlarven hat man Gelegenheit dies zu beobachten. Haben die Thierchen längere Zeit unter dem Mikroskop gelegen, so tritt mit zunehmender Erschöpfung ein seltner Puls und eine langsame Bewegung des Blutes ein. Endlich bemerkt man an der Keimhaut bebrüteter Eier, dass die Temperatur einen Einfluss auf die Häufigkeit der Herzschläge und dem entsprechend einen Einfluss auf die Geschwindigkeit der Blutbewegung ausübe.

Andrerseits habe ich die unzweideutigsten Beweise, dass bedeutende Beschleunigung des Pulses die Geschwindigkeit der Blutbewegung zuweilen nicht steigere, ja in einzelnen Fällen sogar vermindere. Bekanntlich hat Durchschneidung der herumschweifenden Nerven eine ausserordentliche Vermehrung der Pulsfrequenz (bisweilen auf das Doppelte der Schläge) zur Folge; ich benutzte also diesen Umstand, um vergleichende Beobachtungen über die Geschwindigkeit des Blutstroms vor und nach der Durchschneidung anzustellen. Das Resultat war im Allgemeinen das schon angegebene. Bei einem Hunde von 8370 Gr. Körpergewicht ergab sich die Geschwindigkeit der Blutbewegung in der *Carotis* = 257 Mill., der Blutdruck = 1897 Mill. (auf Wasser reducirt) und die Pulsfrequenz = 106—130 Schläge. Nach Durchschneidung der *n. vagi* stieg der Puls auf 212—244 Schläge, während die Stromschnelle auf 137 Mill. und der Blutdruck auf 1320 Mill. herabsank. Doch sind mir allerdings auch Fälle vor-

gekommen, wo die durch die Operation veranlasste Beschleunigung des Pulses eine Vermehrung der Stromschnelle zur Folge hatte.

Ich halte für wahrscheinlich, dass die fieberhafte Beschleunigung des Pulses die Geschwindigkeit des Blutes nicht steigere, und zwar aus folgendem Grunde.

Bekanntlich verhält sich die bewegende Kraft wie das Product der Masse in die Geschwindigkeit. Sollte das Blut im Fieber schneller fliessen, so müsste auch das Herz in einer gegebenen Zeit mehr Blut entleeren, und die gleichzeitige Vermehrung der Masse und der Geschwindigkeit würde eine grössere bewegende Kraft voraussetzen. Eine Vermehrung dieser anzunehmen liegt aber kein Grund vor, im Gegentheil, da die Muskelkraft des ganzen Körpers im Fieber gewöhnlich vermindert ist, liegt näher zu vermuthen, dass auch die Herzkraft eine Schwächung erfahren habe.

§ 103. Es ist wahrscheinlich, dass die Geschwindigkeit der Blutbewegung keinen bedeutenden Schwankungen unterliege, wenn nicht auffallende Eingriffe von aussen, wie Aderlässe, Vivisectionen u. s. w., besondere Störungen veranlassen. Dies wird schon durch die oben mitgetheilten Beobachtungen angedeutet. Denn wenn die Blutgeschwindigkeit in der Kopfschlagader der verschiedensten Säugethiere nur zwischen 205 und 431 schwankte, so lässt sich voraussetzen, dass in denselben Individuen und bei unverletztem Körper die Schwankungen noch geringer ausfallen werden. Uebrigens würde sich die Annahme grosser Verschiedenheiten des Werthes v schon aus theoretischen Gründen nicht rechtfertigen lassen. Da nämlich der Blutdruck nicht minder als der Widerstand, dem er entspricht, eine Function der Geschwindigkeit ist,

$$w = av^2 + bv$$

so würde eine Vermehrung des Werthes v eine um so grössere Erhöhung des Drucks zur Folge haben müssen, als $\frac{v}{w}$ mit wach-

sendem Werthe von v abnimmt, also der Druck in schnellerer Progression zunimmt als die Geschwindigkeit.*)

Da nun aber der mittlere Blutdruck zu Folge der Beobachtungen am Hämodynamometer nur geringen Schwankungen unterliegt, so müssen die Schwankungen der Stromschnelle nothwendig noch geringer ausfallen.

Ein sonderbares Bedenken entsteht, wenn man sich fragt, ob Vermehrung der Herzkraft für sich allein genüge, den Blutlauf zu beschleunigen. Soll das Blut sich rascher bewegen, so muss der Blutdruck wachsen; weiter: wächst der Blutdruck, so werden die Gefässe stärker ausgedehnt, aber erweiterte Gefässe verlangen auch eine grössere Blutmasse zum Inhalte. Eine Vermehrung der Stromschnelle erfordert also entweder eine gleichzeitige Vermehrung der Blutmasse, oder eine vitale Contraction der Blutgefässe, welche dem wachsenden Drucke das Gegengewicht hält und jene Expansion hindert, welche eine grössere Blutmenge beanspruchen würde.

Es bedarf der Bemerkung kaum, dass entsprechende Betrachtungen wiederkehren, wenn von Verlangsamung des Blutlaufes die Rede ist.

Auf Veränderung der Blutmenge ist wenig zu rechnen, mindestens blieben dann alle die Fälle unerklärlich, wo die Werthe von v einem schnellen Wechsel unterliegen. Es scheint daher kaum etwas Anderes übrig zu bleiben, als die Annahme, dass Vermehrung der Herzkraft in der Regel mit einer Zusammen-

---

*) Der Beweis liegt in Folgendem:

$$\frac{v}{w} = \frac{v}{av^2 + bv}$$

$$\frac{v}{w} = \frac{1}{av + b}$$

Wächst v, so wird der Nenner des Bruches auf der rechten Seite grösser, folglich der Bruch selbst kleiner, und folglich auch der ihm gleiche Werth $\frac{v}{w}$ kleiner.

ziehung der Gefässwandungen, Verminderung der Herzkraft dagegen mit Erschlaffung derselben verbunden sei.

§ 104. Wir haben gefunden, dass die Geschwindigkeit der Blutbewegung in der Kopfschlagader der Säuger im Mittel gegen 300 Millim., dagegen in den Haargefässen nur etwa 0,8 Millim. beträgt (§ 94 und 100). Da die Geschwindigkeit sich umgekehrt wie die Weite des Strombettes verhält, so muss die Weite der Gefässhöhle in der Section der Haargefässe gegen 400 Mal grösser sein als in der Section der Carotiden. Natürlich kann man nun auch rückwärts rechnen und aus den Veränderungen, welche die Weite der Gefässhöhle erleidet, die umgekehrt proportionalen Veränderungen der Stromschnelle bestimmen.

Ich habe diesen Grundsatz benutzt, um die ungefähre Geschwindigkeit des Blutes in der Aorte zu ermitteln. Die Methode war folgende:

Es sei a der Ursprung der Aorte, b deren Fortsetzung, c die *arteria anonyma*, *de* zwei Aeste dieser u. s. w. Für jedes dieser Gefässe bestimme ich die Durchschnittsfläche. Bezeichnen wir die Durchmesser dieser Gefässe mit den entsprechenden griechischen Buchstaben, so ist die Durchschnittsfläche der Aorte in der ersten Section $= \frac{\alpha^2 \pi}{4} = A$. In Folge der Theilung der Aorte in b und c entsteht eine zweite Section der Gefässhöhle, welche in der Regel weiter als die erste ist, indem Gefässspaltung, wenige Ausnahmen abgerechnet, eine Erweiterung der Gefässhöhle zur Folge hat. Die Weite dieser zweiten Section ist $\frac{\beta^2 \pi}{4} + \frac{\gamma^2 \pi}{4} = B$. So viel nun B weiter ist als A, um so viel fliesst das Blut in der zweiten Section langsamer als in der ersten.

Ich nehme nun an, dass in beiden Armen der zweiten Section, d. h. in b und c, die Stromschnelle dieselbe sei, und habe

unter dieser Voraussetzung nicht nur die wirkliche Weite von c (gegeben durch Messung), sondern auch die proportionale Geschwindigkeit in ihm (zu finden durch Rechnung). Gesetzt nämlich, die Weite der zweiten Gefässsection verhielte sich zur Weite der ersten $= 5 : 4$, so verhielte sich die Blutgeschwindigkeit in beiden Sectionen umgekehrt $= 4 : 5$.

Ich fahre nun nach demselben Prinzipe fort. Das Gefäss c der zweiten Section theilt sich in de und bildet die dritte Section. Die Weite dieser ist $\frac{\delta^2 \pi}{4} + \frac{\varepsilon^2 \pi}{4} = C$. Wäre die dritte Section wieder $\frac{1}{5}$ weiter als die zweite, so wäre die Stromschnelle in ihr abermals um $\frac{1}{5}$ herabgedrückt. Die Geschwindigkeit betrüge in der zweiten Section $\frac{4}{5}$, in der dritten $\frac{16}{25}$ von derjenigen, welche in der ersten Section, das heisst im Ursprunge der Aorte, statt fand.

Wird also die Geschwindigkeit in d mit Hülfe des Hämodromometers gemessen, und wiederum vorausgesetzt, dass die Strömung in den Collateralästen d und e von gleicher Schnelligkeit sei, so ergiebt sich die Stromschnelle in der Aorte nach den Regeln der Proportionslehre. Halten wir die obigen Voraussetzungen über die Veränderung der Gefässweiten fest und nennen die gemessene Geschwindigkeit in dem Gefässe der dritten Section v, dagegen die unbekannte Geschwindigkeit in der Aorte v', so verhält sich:

$$v : v' = 16 : 25.$$

Anlangend das Prinzip der Rechnung, so ist die Voraussetzung, dass die Geschwindigkeit des Blutes in den Collateralzweigen der Spaltungsstelle dieselbe sei, allerdings ziemlich willkürlich, indess veranlasst sie muthmasslich keine erheblichen Fehler. Freilich muss der engere der beiden Arme, eben weil er enger ist, dem Blute mehr Widerstand entgegensetzen und hiermit die Geschwindigkeit beschränken, aber die engeren Aeste gehören auch zu den kleineren Blutbahnen, und diese begünstigen das Fliessen durch das Minus der ebenfalls hemmenden Länge.

Hierzu kommt noch, dass die Fehler, welche aus der unrichtigen Voraussetzung herrühren, bald auf die eine, bald auf die andere Seite fallen und in zahlreichen Beobachtungen sich einigermassen ausgleichen werden.

§ 105. Berechnungen, wie die eben ausgeführten, haben ein beiläufiges Interesse, auf welches ich hier gleich aufmerksam machen will. Kennt man die Weite der Aorte und die Geschwindigkeit, mit welcher sich das Blut bewegt, so weiss man auch, wie viel das Herz in einer gegebenen Zeit, z. B. in einer Minute, Blut ausleert. Weiter: kennt man die Zahl der Pulsschläge in einer Minute, so kann man auch berechnen, wie viel Blut mit jeder Systole entleert wird.

So wird diese oft behandelte Frage zum ersten Mal in den Kreis directer Beobachtungen gezogen. Eine genügende Lösung derselben ist natürlich nur dann möglich, wenn man die Weite der Aorte richtig bestimmt, d. h. diejenige Weite, welche sie im lebenden Thiere hat. Um dieser Aufgabe so viel als möglich zu entsprechen, verfahre ich auf folgende Weise. Nachdem ich die *Carotis* frei gelegt habe, um den Versuch mit dem Hämodromometer auszuführen, messe ich den Durchmesser derselben mit dem Tasterzirkel. Ist dann der Versuch vollendet und das Thier getödtet worden, so injicire ich das Gefässsystem von der *Aorta abdominalis* aus mit Wachsmasse und unter Anwendung eines Drucks, welcher der *Carotis* die ursprüngliche Weite wiedergiebt. Nachdem dieses geschehen, werden die Messungen ausgeführt, von welchen oben die Rede war.

Bei diesem Verfahren ist man nun zwar nicht sicher, dass der Theil des Gefässsystems, auf dessen Messung es ankommt, ganz gleichmässig ausgedehnt werde, es kann z. B. die Aorte im Vergleich zur Kopfschlagader eine übertriebene Weite erhalten, aber glücklicher Weise ändert dies nichts im Resultate der Rechnung, wenn nur das Gefäss, an welchem die Geschwindigkeit bestimmt wurde, und von welchem die Rechnung ausgeht, seine normale Weite erhält. Wir wollen ein auffallendes Beispiel anführen

und annehmen, die Aorte habe durch die Injection das Doppelte ihrer natürlichen Weite bekommen. Wird nun berechnet, um wie viel sich die Gefässhöhle von der Aorte bis zur *Carotis* erweitert, so entsteht über die Erweiterung ein grosses Deficit, oder es findet sich gar statt der wirklichen Erweiterung eine Contraction der Gefässhöhle. Indess ist einleuchtend, dass man beim Berechnen der Geschwindigkeit sich wiederum irrt und zwar in gleichem Masse, nur im entgegengesetzten Sinne, so dass die Fehler sich gegenseitig aufheben. Gesetzt, man hätte die von der Aorte gegen die *Carotis* hin statt findende Erweiterung um das Doppelte unterschätzt, so wird man das Verhältniss der Geschwindigkeit in der *Carotis* zu der in der Aorte nothwendig um das Doppelte überschätzen. Man erhält für die Aorte nur den halben Werth ihrer wahren Geschwindigkeit. Nun ist es für die Schätzung der Blutmasse, welche die Systole entleert, offenbar gleichgültig, ob 200 Mill. einer 2 Zoll weiten, oder 400 Mill. einer 1 Zoll weiten Aorte durch die Zusammenziehung des Herzens mit Blut erfüllt werden.

Ich habe eine kleine Anzahl hierhergehöriger Beobachtungen angestellt, und habe die Masse des Blutes, welches bei jeder Systole entleert wird, mit der Masse des Thieres verglichen. In der folgenden Tabelle, welche über die Geschwindigkeit der Blutbewegung in der Aorte Aufschluss giebt, sind die Resultate dieser Untersuchungen mit aufgenommen. Die Gewichte der Pferde beruhen nur auf Schätzung eines kundigen Veterinärarztes.

Hämodromometer-Versuche.

Thierart	Gewicht in Kilogramm.	Puls	Blutgeschwindigkeit. beobachtet in der *Carotis*	Blutgeschwindigkeit. berechnet für die Aorte	Inhalt des Ventrikels. absolut nach Gramm.	Inhalt des Ventrikels. relativ zum Körpergewicht
1. Hund	18,74	100	273	305	38,64	$\frac{1}{485}$
2. Hund	13	110	262	256	34,69	$\frac{1}{375}$
3. alte Ziege	25	154	358	706	70,24	$\frac{1}{359}$
4. junge Ziege	11,55	120	280	326	32	$\frac{1}{359}$
5. Hund	4,95	100	329	368	12,5	$\frac{1}{396}$
6. junge Ziege	15,0	160	240	403	22,68	$\frac{1}{660}$?
7. Pferd	300?	56	431	496	741,9	$\frac{1}{404}$
8. Schaf	30,54	92	287,5	993	77,7	$\frac{1}{393}$
9. Hund	9,1	120	280	292	31,38	$\frac{1}{289}$
10. Schaf	23,48	88	241	214	51,12	$\frac{1}{459}$
11. Hund	18,905	104	238	369	41,2	$\frac{1}{437}$
12. Hund	12,752	62	205	260,5	38,9	$\frac{1}{328}$

Die Werthe für die Geschwindigkeit des Blutes in der Aorte schwanken ganz ausserordentlich, offenbar deshalb, weil sie berechnet sind aus Dimensionsverhältnissen der Gefässhöhle, welche dem störenden Einflusse der anatomischen Injectionen ausgesetzt waren. Nimmt man an, dass diese Störungen bald zu Gunsten, bald zu Ungunsten der berechneten Geschwindigkeit ausfallen, und zieht aus sämmtlichen erhaltenen Zahlen das Mittel, so erhält man in runder Summe 400 Mill. als Stromschnelle in der Aorte und 300 M. als Geschwindigkeit in der *Carotis*.

Die Quantität Blut, welche das Herz mit jeder Systole entleert, steht im Verhältnisse zur Masse des Thieres, wie die in der letzten Columne meiner Tabelle gegebenen Verhältnisszahlen zeigen. Abstrahiren wir von der sechsten Beobachtung, welche gänzlich aus der Reihe fällt, so verhält sich das vom Herzen entleerte Blut zur Körpermasse im Mittel = 1 : 400, und die Abweichung der einzelnen Fälle von diesem Mittelwerthe ist ver-

hältnissmässig unbedeutend, jedenfalls aber nicht grösser, als man der Natur der Sache nach erwarten durfte. *)

§ 106. Es ist also darüber nicht der mindeste Zweifel übrig, dass die Stromschnelle von den grossen Arterienstämmen gegen die Arterienäste, und von den Aesten gegen die Capillaren allmälig abnehme, ein Resultat, welches schon Spallanzani auf dem Wege mikroskopischer Beobachtungen erhalten hatte. Ebenso unzweifelhaft ist, dass die Abnahme der Geschwindigkeit in den ersten Sectionen des Gefässsystems sehr langsam, in den kleinsten Arterien dagegen und im Anfange des Capillarnetzes sehr rasch erfolge.

Unbekannt ist, ob das Minimum der Geschwindigkeit, welches im Haargefässnetze eintritt, in allen Organen desselben Thieres einen ungefähr gleichen Werth habe. Die einzige vergleichende Beobachtung, welche ich kenne, ist die von Hales, welcher die Schnelligkeit des Blutes in den Capillaren der Lunge 43 Mal grösser als die in den Haargefässen eines Bauchmuskels gefunden zu haben versichert. Indess verdient diese Angabe wenig Zutrauen. In den Bauchmuskeln fand sich nämlich $v = 0{,}133''$, d. h. die Stromschnelle war nur wenig langsamer, als man sie im Gekröse der Frösche und in den Schwänzen der Froschlarven gewöhnlich findet. Nun ist aber schon die Beobachtung einer so langsamen Bewegung nicht leicht wegen der scheinbaren Schnelligkeit derselben unter dem Mikroskope. Eine 43 Mal raschere Bewegung zu messen, würde ein Ding der Unmöglichkeit sein. Hales hätte also, um jene scheinbare Schnelligkeit zu

*) Setzen wir das mittlere Körpergewicht des Menschen = 75 Kilogramm., so entleert nach diesem Massstabe das Herz mit jeder Systole 188 Gramm. = 6,2 Unzen. Sollte man diese Quantität zu gross erachten, so erwäge man, dass die weit niedrigeren Angaben der meisten Physiologen auf blossen Vermuthungen und selbst die höheren auf Messungen beruhen, welche nothwendig zu geringe Werthe geben mussten. Der Ventrikel, dessen Inhalt man misst, ist zusammengefallen, der Ventrikel des lebendigen Thieres dagegen ist, ehe er sich entleert, durch die Kraft des Vorhofes ausgedehnt.

verringern, ein sehr schwaches Mikroskop anwenden müssen, und zwar, wie ich glaube, ein so schwaches, dass die Blutkörperchen durch dasselbe nicht mehr deutlich erkannt werden konnten. In diesem Falle wäre dann auch die Stromschnelle nicht mit Sicherheit zu bestimmen gewesen, deren Messung eben davon abhängt, dass man beobachtet, wie viel Zeit ein Blutkörperchen brauche, um durch eine Gefässstrecke von bekannter Länge hindurchzuschwimmen.

Ich bemerke beiläufig, dass ich von Beobachtungen über die Geschwindigkeit der Blutbewegung in den Haargefässen in allen den Fällen wenig erwarte, wo man genöthigt ist, die mikroskopische Untersuchung durch Vivisectionen einzuleiten. Nicht nur die Blutungen, die dann entstehen, sondern auch die Zerrungen beim Zurechtlegen der Theile, denen man die nöthige Durchsichtigkeit zu geben bemüht ist, verändern die natürlichen Verhältnisse. Wer das Gekröse oder die Lungen eines Frosches oft unter dem Mikroskope betrachtet hat, muss wissen, dass in den meisten Fällen das Blut in einzelnen Gefässen völlig still steht.

Nach Wahrscheinlichkeitsgründen ist anzunehmen, dass die Schnelligkeit der Blutbewegung in den Organen sich in einem umgekehrten Verhältnisse zu deren Entfernung vom Herzen befinde. Je entfernter das Organ vom Herzen, um so länger ist die zu ihm gehörige Blutbahn; je länger die Blutbahn, um so grösser der Widerstand; je grösser endlich der Widerstand, um so geringer die Kraft der Bewegung. Wenn also nicht etwa in den vom Herzen entfernter liegenden Organen die durch die Länge der Blutbahn erzeugten Hemmnisse durch besondere Einrichtungen (wie beispielsweise durch Weite der Capillaren) compensirt werden, so ist in ihnen eine langsamere Blutbewegung vorauszusetzen. *)

*) Die Blutbahnen, von welchen hier die Rede ist, verhalten sich zu einander offenbar wie die Collateralarme der verzweigten Röhrensysteme, von welchen in einem früheren Abschnitte gehandelt wurde. Als Beleg für das eben Gesagte gilt also das § 39 beschriebene Experiment, aus welchem

Wenn in den Arterien die Geschwindigkeit des Blutes allmälig abnimmt, so nimmt sie in den Venen allmälig zu, was damit zusammenhängt, dass in der Regel die Vereinigung zweier Venen in eine grössere mit Verengerung der Gefässhöhle verbunden ist.

Gewöhnlich sind die Venen weiter als die ihnen entsprechenden Arterien, und in dieser Beziehung allein hat es einen Sinn zu behaupten, dass das Blut in den Venen langsamer fliesse.

§ 107. In den Arterien ist die Geschwindigkeit des Blutes keine gleichmässige, vielmehr fliesst letzteres stossweise bei jeder Systole schneller. Man sieht dies an kleinen, hinreichend durchsichtigen Arterien unter dem Mikroskope und bemerkt es auch im Hämodromometer, besonders auffallend bei trägem Pulse. In den grösseren Arterienstämmen ist diese Ungleichheit der Bewegung auffallender als in den kleinen Zweigen; in den Haargefässen und Venen fehlt sie gänzlich.

Ich glaube mich einer Erklärung dieser Erscheinungen hier entheben zu können, da dieselbe in dem enthalten ist, was ich § 61 über den Zusammenhang der Wellen und Strombewegung ausführlich erörtert habe.

Cap. VII.

Von der Kraft des Herzens.

§ 108. Borelli schätzt die Herzkraft = 180,000 Pfund, Keil = 5 Unzen, Jurin = 9 *Ctr.*, Hales = 51,5 *Ctr.*, Poisseuille = 4 *Ctr.* 3 Drachmen.

Die ausserordentliche Verschiedenheit dieser Angaben beruht

sich ergiebt, dass von zwei Collateralästen der längere die Bewegung am meisten aufhält.

zum grössten Theil darauf, dass die Autoren mit dem Worte Herzkraft verschiedene Begriffe verbanden, zum Theil aber auch darauf, dass man die Zahlen nicht aus Beobachtungen, sondern aus willkürlichen Voraussetzungen ableitete.

Borelli z. B. nahm an, dass die Muskelfaser aus einer Kette von Rhomben bestehe, deren Diagonalen bei der Zusammenziehung des Muskels eine Verkürzung erfahren müssten, und berechnete, welchen Aufwand von Kraft die Natur brauche, um ein so gebautes Herz in dem Grade zusammenzuziehen, dass es den Widerstand des Blutes zu überwinden im Stande sei.

Hales dagegen verstand unter Herzkraft den Widerstand, welchen die Innenfläche der linken Herzkammer dem Drucke des Blutes entgegensetzt, denn er erhielt die von ihm angegebenen 51,5 M. dadurch, dass er die muthmassliche Widerstandshöhe des Blutes mit der Innenfläche des Ventrikels multiplicirte und die hierdurch erhaltene Blutmasse auf ihr Gewicht zurückführte.

Ich verzichte darauf, die Angaben älterer Schriftsteller einer kritischen Beleuchtung zu unterwerfen, und beschränke mich auf eine Prüfung der Ansichten Poisseuilles, um so mehr, da gegenwärtig nur diese noch in weiten Kreisen Anerkennung finden.

§ 109. Poisseuille stellt sich die Aufgabe, die Kraft zu schätzen, mit welcher die linke Herzkammer das Blut in die Aorte treibe, und verfährt auf folgende Weise.

Er misst mit Hülfe des Hämodynamometers den Blutdruck in einer beliebigen Arterie und nimmt an, dass der Druck in allen Arterien, also auch am Ursprunge der Aorte, derselbe sei. Dieser Druck soll nach seinen Beobachtungen dem Drucke einer Quecksilbersäule von 160 Mill. Höhe ungefähr gleichkommen.

Hieraus wird geschlossen, jedes Molekül Blut bewege sich mit einer Kraft, welche im Stande sei, dem Drucke einer Quecksilbersäule von 160 Millim. Höhe das Gleichgewicht zu halten; auch sei diese Kraft der Bewegung durch das ganze Arteriensystem dieselbe. Wenn dem so ist, heisst es weiter, so findet man die Kraft, welche einer Arterie von gegebener Weite ent-

spricht, wenn man die Durchschnittsfläche des Gefässes mit der Druckhöhe multiplicirt und die auf diese Weise gefundene Quecksilbersäule auswiegt, welche den Werth des Blutdrucks (160 Millim.) zur Höhe und die Weite der Arterie zur Durchschnittsfläche hat.*)

Diese Betrachtungen enthalten so wesentliche Irrthümer, dass die auf sie begründete Schätzung der Herzkraft auf keinen Fall anerkannt werden kann.

1) Mit Unrecht wird behauptet, das Blut bewege sich mit einer Kraft, welche im Stande sei, das Quecksilber im Hämodynamometer zu tragen. Das Blut bewegte sich offenbar in den Arterien, in welche Poisseuille sein Instrument einführte, gar nicht. Das Blut des untersuchten Gefässes übte einen Druck aus, welcher gleich kam dem Seitendrucke desjenigen Blutes, welches am Ursprunge eben dieses Gefässes vorbeifloss. Um dieses Vorbeifliessen zu bewirken, war eine Kraft der Bewegung nöthig, über deren Grösse das Instrument keinen Aufschluss giebt.

2) Mit Unrecht wird behauptet, dass der Blutdruck in allen Arterien gleich sei; derselbe nimmt abwärts vom Herzen ab.

3) Vollkommen sinnlos ist die Behauptung, dass jedes Molekül Blut durch das ganze Arteriensystem mit derselben Kraft ströme. Nach einem bekannten Gesetze verhält sich die Kraft der Bewegung wie das Product der Massen in die Geschwindigkeit. Nun ist aber ein Molekül eine kleine Masse, und seine bewegende Kraft wird sich verhalten müssen wie seine Geschwindigkeit. Hieraus ergiebt sich zur Genüge, dass die bewegende

*) *Brechet, Répertoire général Vol. VI.* Die Hauptstellen sind pag. 86: *Le poids du cylindre de mercure, dont la base serait le cercle donné par ce diamètre* (der Arterie nämlich) *et la hauteur celle de la colonne de mercure obtenue, sera la force statique totale, avec laquelle le sang se meut dans cette artère; c'est-à-dire que si l'on y plaçait un diaphragme, maintenu du côté opposé au cours du sang par une force égale à ce poids le sang cesserait de se mouvoir dans l'artère.* . — und ebendaselbst pag. 81: *Une molécule de sang se meut avec la même force dans tout le trajet du système artériel.*

Kraft eines Moleküls in verschiedenen Arterien sehr verschieden ausfallen müsse, denn die Geschwindigkeit der Blutbewegung ist sehr verschieden.

Poisseuille unterschätzt die Herzkraft in Folge eines doppelten Fehlers, einmal, weil er die Geschwindigkeitshöhe ganz unbeachtet lässt, und dann, weil er einen Bruchtheil des Widerstandes für den ganzen nimmt.

§ 110. Leitet man die Kraft, welche das Blut durch die Gefässe treibt, vom Herzen ab, und will man dieselbe von Seiten ihrer mechanischen Leistung schätzen, so ist zu sagen: Die Herzkraft muss gross genug sein, um einerseits die dem Blute entgegentretenden Widerstände zu bewältigen, andrerseits die gegebene Geschwindigkeit der Strömung hervorzubringen. Wir können uns vorstellen, diese Kraft ($= H$) werde durch eine Quecksilbersäule ausgeübt, deren einer Theil ($= f$) das Fliessen vermittle, während der andere ($= w$) zur Besiegung der Widerstände diene. In diesem Falle erhalten wir die schon viel besprochene Gleichung $H = f + w$.

Nach früheren Untersuchungen sind wir im Stande, über die Werthe f und w zu urtheilen. Anlangend den Widerstand, so fanden wir wahrscheinlich, dass der in der Kopfschlagader ermittelte Druck nur etwa $\frac{3}{4}$ des Drucks *in maximo* betrage, und wir setzten daher w in Säugethieren annäherungsweise auf 200 Millim. Quecksilberhöhe.

Was ferner den Werth von f betrifft, so ergiebt sich dieser aus der gemessenen Stromschnelle nach der Formel $f = \frac{v^2}{4g}$. Wenn nun nach § 105 die Geschwindigkeit des Blutes im Anfange der Aorte gegen 400 Millim. beträgt, so berechnet sich die Geschwindigkeitshöhe zu 8,2 Millim. Hierbei ist nicht zu übersehen, dass der letztere Werth an die Substanz des Blutes gebunden ist und nicht etwa auf die Höhe einer Quecksilbersäule bezogen werden kann. Um eine übersichtliche Gleichung zu erhalten, müssen die Werthe von f und w mit gleichem Masse ge-

messen sein, ich werde also den Widerstand, welcher bisher durch den Druck einer Quecksilbersäule von gegebener Höhe bestimmt wurde, von nun an durch den Druck einer entsprechenden Blutsäule ausdrücken. Da nun Quecksilber ungefähr 13,5 Mal schwerer als Blut ist, so ist $w = 200 \times 13{,}5 = 2700$. Hiernach haben wir

$$H = 8{,}2 + 2700 \text{ Millim.},$$

woraus sich das interessante Resultat ergiebt, dass ein überaus geringer Theil der Herzkraft, nämlich ungefähr $\frac{1}{300}$, ausreicht, die Bewegung der Blutmasse durchzusetzen, während alles Uebrige zur Gewältigung der Widerstände verwendet wird.

Wenn wir nun, von einem theoretischen Standpunkte ausgehend, in Poisseuilles Schätzung der Herzkraft zwei Missgriffe tadeln mussten, erstens nämlich, dass er die Kraft, welche das Blut in Bewegung setzt, ganz ausser Acht gelassen, und dann, dass er den Druck, welcher die Widerstände überwindet, zu gering erachtet, so zeigt sich gegenwärtig, dass der erste dieser beiden Fehler auf das Resultat der Rechnung keinen merklichen Einfluss hat.

Da die Herzkraft beinahe ausschliesslich zur Ueberwindung des Widerstandes verwendet wird, letzterer aber von Poisseuille annäherungsweise um $\frac{1}{4}$ unterschätzt wurde, so dürfte auch seine Schätzung der Herzkraft nur etwa um $\frac{1}{4}$ zu niedrig sein. Auf diesen Fehler lege ich zwar in arithmetischer Beziehung um so weniger Gewicht, als die Zahlen, um welche es sich hier handelt, nur ungefähre Grössen sind, aber in theoretischem Interesse musste er demohngeachtet hervorgehoben werden, da er sich als Folge wesentlich falscher Betrachtungen herausstellt.

Cap. VIII.

Von dem gesetzlichen Verhältnisse des Blutdrucks zu der Geschwindigkeit der Blutbewegung.

§ 111. Wenn man nicht etwa die Gültigkeit der physikalischen Gesetze in organischen Körpern von vorn herein leugnet, ein Standpunkt, welchen einige Naturphilosophen noch immer zu behaupten suchen,*) so wird man nach allem Vorausgeschickten begreifen, dass zwischen dem Blutdrucke und der Blutgeschwindigkeit ein Verhältniss bestehen müsse, welches an feste Zahlen gebunden und nach den Grundsätzen der Hydrodynamik bestimmbar sei. Ist einmal erwiesen, dass der Druck der Flüssigkeiten auf die Wandungen der Röhren von den Widerständen abhänge, welche die Bewegung behindern; ist ferner erwiesen, dass der Widerstand und der ihm proportionale Druck eine Function der Geschwindigkeit sei, so kann auch für den physikalisch gebildeten Physiologen kein Zweifel sein, dass eine rasche Circulation mit grossem Blutdrucke und eine langsame Blutbewegung mit geringem Drucke verbunden sein müsse.

Eine gewisse Bestätigung dieser Voraussetzung liefern bereits unsere Erfahrungen über die Folgen der Blutverluste. Mit allmäliger Verminderung der Blutmenge sahen wir den Hämodynamometer fallen, aber auch die Geschwindigkeit der Blutbewegung abnehmen (§ 101); es geschah also, was nach hydrodynamischen Gesetzen geschehen musste.

Ein solches ungefähres Verhältniss zu constatiren, kann der Wissenschaft nicht genügen; es handelt sich darum zu untersuchen, ob die Formel:

$$w = av^2 + bv$$

*) Man vergleiche *D. W. Grabau*, die vitale Theorie des Blutkreislaufes. Altona 1841.

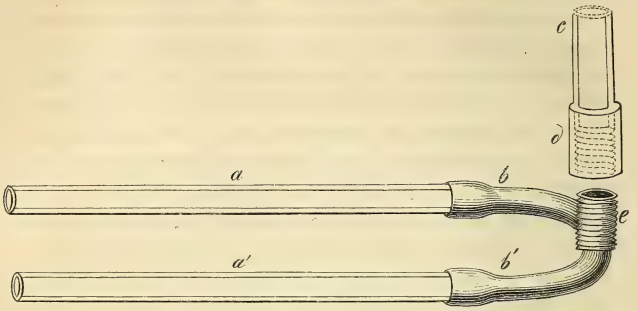
auch im Kreislaufe des Blutes ihre Geltung habe, mit anderen Worten, es handelt sich darum, ob für das Gefässsystem eines lebenden Thieres constante Widerstandscoëfficienten bestehen, mit deren Hülfe sich aus der Geschwindigkeit der Blutbewegung der mit ihr verbundene Druck, und umgekehrt aus dem Blutdrucke die gleichzeitig vorkommende Geschwindigkeit ermitteln lasse. Ueber die Methode, die Widerstandscoëfficienten zu berechnen, ist Cap. I § 8 und 10 das Nöthige bemerkt worden, hier dürfte nur anzuführen sein, wie ich die zusammengehörigen Werthe von w und v bestimmt habe.

Es genügt natürlich nicht, in einem Experimente mit dem Hämodromometer die Geschwindigkeit, und in einem zweiten mit dem Hämodynamometer den Blutdruck zu bestimmen, da, wenn überhaupt Schwankungen in den Zahlenwerthen beider statt finden, eben Alles darauf ankommt zu zeigen, wie die Veränderung der einen Grösse eine gleichzeitige Veränderung der andern mit sich bringt.

Ich habe also an meinem Hämodromometer einen Druckmesser von der § 80 beschriebenen Bauart angebracht, worauf das Instrument zur Bestimmung der coincidirenden Werthe von w und v geeignet ist, aber freilich die gleichzeitige Thätigkeit zweier geübten Beobachter in Anspruch nimmt. *)

Die Einrichtung des Apparates ist nun folgende: Die haarnadelförmig gebogene Glasröhre besteht aus zwei Stücken aa', zwischen welche ein Stück Messingröhre bb', von demselben Kaliber eingeschoben ist. Auf der Mitte der letzteren ist der Druckmesser in der Weise befestigt, dass er lothrecht zu stehen kommt, wenn der Hämodromometer, wie im Versuche immer, eine horizontale Lage hat.

*) Diese Versuche sind viel früher angestellt worden, als das Kymographion bekannt wurde, sonst würde ich mich dieses trefflichen Instrumentes zur Bestimmung des Drucks bedient haben.



Um den Druckmesser auf dem Hämodromometer befestigen zu können, ist auf der Messingröhre eine Hülse, *e*, angebracht, welche durch eine Oeffnung mit dem Inneren der Röhre zusammenhängt, äusserlich aber mit einem Gewinde versehen ist, auf welches der Manometer *c* aufgeschraubt werden kann. Letzterer ist nämlich an seinem unteren Ende mit einer Zwinge, *d*, versehen, welche innerlich ein Gewinde hat, welches auf *e* passt. An dem oberen, in der Figur nicht sichtbaren Ende des Manometers befindet sich ein Deckel, welcher hermetisch schliesst, und welcher, weil er angeschraubt ist, leicht entfernt werden kann. Anlangend die Dimensionen dieses Theiles, so ist eine Länge von 500 Millimeter empfehlungswerth, die Weite aber muss, aus später anzugebenden Gründen, der des Hämodromometers gleich sein. Der Nullpunkt der Scala des Druckmessers liegt unmittelbar über der Zwinge *d*, am Anfange der Glasröhre *c*, von unten an gerechnet. Will man das Instrument brauchen, so injicirt man es auf die oben beschriebene Weise (§ 80) mit Wasser und treibt dieses genau bis zum Nullpunkt der Scala. Begreiflicher Weise muss während dieser Füllung der Manometer am oberen Ende offen stehn, und erst nachmals muss der Deckel und zwar mit grösster Sorgfalt verschlossen werden.

§ 112. Die Anbringung des Druckmessers am Hämodromometer hat Einfluss auf die Geschwindigkeit, mit welcher das Blut durch die Glasröhre fliesst, und zwar einen beschleunigenden. Der geschlossene Raum des Druckmessers ist mit Luft gefüllt, welche von vorn herein nur unter dem Drucke der Atmosphäre steht. Nach Einbringung des Instrumentes in die Arterie und nach Eröffnung der Hähne wirkt vom Gefässsysteme her ein weit grösserer Druck. Die Folge ist, dass das Wasser, welches in der gebogenen Glasröhre befindlich ist, urplötzlich in dem Druckmesser emporsteigt, und dass das Blut von der Seite des Gefässes her eben so plötzlich dem Wasser nachströmt.

Es entsteht die Frage: Um wieviel ist unter diesen Umständen die Geschwindigkeit der Blutbewegung beschleunigt worden? Man könnte geneigt sein zu antworten: Die wahre Geschwindigkeit wird gefunden, wenn man von dem Raume, welchen das Blut in dem Hämodromometer zurückgelegt hat, abzieht den Raum, welchen das Wasser im Druckmesser erfüllt hat. Das Wasser steigt nämlich im Druckmesser in Folge des zu geringen Widerstandes, welcher hier statt findet. Stiege es 100 Mill., so würden 100 Mill. Blut nachrücken müssen, vorausgesetzt natürlich, dass Druckmesser und Hämodromometer ein gleiches Kaliber haben. Nehmen wir an, das Blut habe in 3 Secunden einen Raum von 1000 Millim. Länge durchströmt, so hat es 100 Mill. Weges in Folge ungehörig verminderter Widerstände zurückgelegt und nur 900 Mill. in Folge der Herzkraft.

Diese Betrachtung würde annäherungsweise richtig sein, wenn das Vacuum, welches durch das Emporsteigen des Wassers zu entstehen droht, nur durch ein Nachdringen des Blutes von Seiten des Herzens her verhindert würde. Dies ist nicht der Fall. Das Blut dringt vielmehr in beide Schenkel (Taf. III Fig. 1 $\beta\,\beta'$) der gebogenen Glasröhre, und zwar mit dem Ueberschusse an Kraft, welchen der Druck in der Messingröhre des Hämodromometers (Fig. 1 A) vor dem Drucke im Manometer so lange voraus hat, bis der Druck sich ins Gleichgewicht gesetzt hat. In mehre-

ren Versuchen war das Eindringen des Blutes in beide Schenkel der Glasröhre im Momente der Oeffnung des Hahnes sichtbar.

Nach dem Vorausgeschickten scheint angenommen werden zu müssen, die wahre Stromschnelle werde gefunden, wenn man von dem Raume, welchen das Blut im Hämodromometer zurückgelegt hat, abzieht den halben Raum, welchen das Wasser im Druckmesser erfüllt hat. Nach diesem Prinzip habe ich die Geschwindigkeit der Blutbewegung geschätzt, und es versteht sich nun von selbst, weshalb ich oben behauptete, dass für Hämodromometer und Druckmesser eine gleiche Röhrenweite nöthig sei.

In der Besorgniss aber, dass diesen Betrachtungen doch noch ein versteckter Fehler zu Grunde liegen könnte, habe ich an Mittel gedacht, den Einfluss eines solchen so unschädlich als möglich zu machen. Dies geschieht ganz einfach dadurch, dass man den Wasserstand im Druckmesser schon vor dem Versuche annäherungsweise auf die Höhe bringt, welche er voraussichtlich während des Versuches haben wird. Es gehört also zu jedem Versuche ein Vorversuch, dessen Zweck nur der ist, die ungefähre Druckhöhe zu ermitteln. Gesetzt nun, man hätte mit Rücksicht auf den Vorversuch das Wasser im Druckmesser bis auf eine Höhe von 100 Millim. emporgedrängt, im Versuche selbst aber stiege es auf 120 Millim.; gesetzt ferner, das Blut hätte in der Zeitdauer des Experimentes einen Weg von 1000 Millim. und mehr zurückgelegt, so kann der Fehler, welcher bei Abschätzung der Stromschnelle durch die Gegenwart des Druckmessers veranlasst wird, nur überaus gering sein, um so geringer, da er durch die oben angegebene Correctur, wenn nicht ganz, doch theilweise beseitigt wird.

Eine besondere Erwähnung verdient noch das Verfahren, wie man das Wasser im Manometer bis zu der gewünschten Druckhöhe emporhebt. Nachdem man den Apparat in der Weise mit Wasser gefüllt, wie am Ende des § 111 angegeben worden, und nachdem man den Hahn in der Weise gestellt hat, dass die Glasröhre verschlossen, die Messingröhre dagegen offen ist, setzt man

die mit Wasser gefüllte, jedenfalls ganz luftleere Spritze ein zweites Mal an, spritzt etwas Wasser durch die Messingröhre, um alle Luft, welche sich in ihr befinden könnte, auszutreiben, und schliesst dann mit dem Finger die Oeffnung derselben, durch welche das Wasser abfliesst. Ist dies geschehen, so lässt man den Hahn in der Weise drehen, dass dem Wasser der Zutritt in die Glasröhre gestattet wird. Indem man nun die Ausflussöffnung des Hämodromometers fortwährend mit dem Finger geschlossen hält, drückt man gegen den Stempel der Spritze so lange, bis das Wasser im Druckmesser die erforderliche Höhe erreicht hat, und dreht, wenn dies geschehen, den Hahn rückwärts, um die Glasröhre abzuschliessen und den Abfluss des unter einem gewissen Drucke befindlichen Wassers zu verhindern. Das Wesentliche ist also, jedes Eindringen der Luft in den Druckmesser zu verhindern, da dieses Fehler in der Schätzung des Widerstandes zur unvermeidlichen Folge haben würde.

§ 113. An einem Schafe habe ich folgende Beobachtungen gemacht:

1. Beobachtung. Pulsschläge in einer Minute 88, Geschwindigkeit des Blutes in der Kopfschlagader 241 Millim., Blutdruck 1957,5 Millimeter.*)

2. Beobachtung. Puls 82, Blutgeschwindigkeit 181 Millimeter, Blutdruck 1466,1.

3. Beobachtung. Puls ungleich, im Mittel 90, Blutgeschwindigkeit 313 Mill., Blutdruck 3240 Mill.

Aus diesen gegebenen Werthen habe ich nach der Methode der kleinsten Quadrate folgende Coëfficienten abgeleitet: $a = 0{,}02029$; $b = 3{,}8336$.

Berechnet man nun mit Hülfe dieser Coëfficienten und nach Anleitung der Formel $w = av^2 + bv$ aus den beobachteten Geschwindigkeiten die Widerstände, so erhält man:

*) Die Zahl bezieht sich hier, wie in allen folgenden Druckwerthen, auf die Höhe einer Blutsäule.

Beobachtung	Widerstand berechnet	beobachtet	Fehler
1.	2102,2	1957,5	$+\frac{1}{14}$
2.	1358,5	1466,1	$-\frac{1}{13}$
3.	3187,5	3240	$-\frac{1}{65}$

Berechnet man aber mit Hülfe der Formel:

$$v = -\frac{b}{2a} + \sqrt{\frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2}{4} + \frac{w}{a}}$$

aus den beobachteten Druckwerthen oder Widerständen die Geschwindigkeiten, so erhält man:

Beobachtung	Geschwindigkeit berechnet	beobachtet	Fehler
1.	230,2	241	$-\frac{1}{24}$
2.	190,4	181	$+\frac{1}{20}$
3.	316	313	$+\frac{1}{101}$.

Indem nun die berechneten und beobachteten Werthe sehr gut zusammenstimmen, bestätigt sich die Vermuthung, dass Widerstand und Stromschnelle auch im Blutkreislaufe durch feste Gesetze geregelt werden.

Es scheint hier der geeignetste Ort, gleich noch einer zweiten Versuchsreihe zu gedenken, welche ebenfalls an einem Schafe angestellt wurde. Aus vier Beobachtungen ergeben sich die Widerstandscoëfficienten:

$$a = 0{,}005386;\ b = 3{,}227.$$

In der folgenden Tabelle habe ich die beobachteten und berechneten Werthe neben einander gestellt:

Widerstände beobachtet	berechnet	Fehler	Stromschnelle beobachtet	berechnet	Fehler
1. 2281 Mill.	2367,9	$+\frac{1}{26}$	428 Mill.	417,4	$-\frac{1}{39}$
2. 2424 »	2236,2	$-\frac{1}{12}$	411 »	435,7	$+\frac{1}{8}$
3. 1541 »	1744,4	$+\frac{1}{7}$	344 »	314	$-\frac{1}{11}$
4. 1512 »	1401,5	$-\frac{1}{15}$	292 »	319,6	$+\frac{1}{11}$.

Also auch hier stimmen Theorie und Erfahrung ganz leidlich zusammen, denn eine genaue Uebereinstimmung kann bei der Grösse der möglichen Beobachtungsfehler überhaupt nicht erwartet werden.

§ 114. Der Versuch, aus den beobachteten Werthen von w und v die Widerstandscoëfficienten zu berechnen, misslingt bei Weitem in den meisten Fällen, was mich nicht hindert anzunehmen, dass die hydrodynamischen Gesetze im Thierkörper doch gelten. In der That kann das Misslingen der meisten Versuche nicht im Mindesten befremden, wenn man folgende Umstände in Erwägung zieht.

Gesucht werden zwei unbekannte Grössen; hierzu gehören mindestens zwei Erfahrungen über das Verhältniss $v : w$. — Nach bekannten mathematischen Grundsätzen müssen aber die beiden gegebenen Fälle, aus welchen man die unbekannten Grössen ableitet $\left(\text{hier die Werthe } \frac{v}{w} \text{ und } \frac{v'}{w'}\right)$, weit aus einander liegen, wenn das Resultat der Rechnung die Wahrscheinlichkeit für sich haben soll. Nun schwanken aber, wie früher gezeigt wurde, die Werthe der Stromschnelle und des Blutdrucks in der Regel nur sehr wenig, in manchen Fällen so gut wie gar nicht, und hiermit wird die Möglichkeit zu rechnen ganz aufgehoben.

Unterscheiden sich die Werthe der Stromschnelle und des Blutdrucks in geringerem Masse, so kann die nicht unbedeutende Grösse der Beobachtungsfehler zur Folge haben, dass die Verhältnisse sich umkehren, so dass eine grössere Geschwindigkeit mit einem kleineren Drucke und eine geringere Geschwindigkeit mit einem grösseren Drucke zusammenfällt. Dergleichen Irrungen sind hier um so leichter möglich, als die Beobachtungen am Druckmesser gerade bei diesen Untersuchungen vorzugsweise unzuverlässig sind. Der Druck, welchen man wissen müsste, wäre eigentlich der mittlere Druck, während der ganzen Dauer der Beobachtung, nicht aus einem Höhen- und aus einem

Tiefenstande der oscillirenden Blutsäule, sondern das Mittel aus allen. Die Bestimmung des Mitteldrucks in meinen Versuchen ist aber mehr nicht als eine ungefähre Schätzung. *)

Aus dem Allen ergiebt sich, dass eine Berechnung der Widerstandscoëfficienten nur gelingen kann, wenn man Fälle vor sich hat, in welchen die Werthe $\frac{v}{w}$ sich auffallend unterscheiden, und solche Fälle sind, wie bemerkt, überaus selten.

§ 115. Ich zeigte so eben, dass eine Reihe von Beobachtungen, wo die verschiedenen Werthe von w und von v sich sehr nahe liegen, zum Aufsuchen der Widerstandscoëfficienten nicht sehr geeignet sei, weil das Gesetzliche der Verhältnisse hinter den Beobachtungsfehlern verborgen bleibt. Eine derartige Beobachtungsreihe spricht indess indirect noch einigermassen für unsere Theorie, wenn die beobachteten Werthe durch kleine Correcturen, welche die Grenzen der möglichen Beobachtungsfehler nicht übersteigen, in der Weise transformirt werden können, dass dann die Formel passt.

Ich werde einen derartigen Fall mittheilen. Bei einem Pferde, welches lange an Caries gelitten, mehrmals trepanirt worden und durch schlechte Fütterung in den letzten 8 Tagen sehr geschwächt worden war, wurde mein Messinstrument, wie gewöhnlich, in der *art. carotis* angebracht. Nun fand sich in 4 Beobachtungen:

Beobachtung	Stromschnelle	Blutdruck
1.	242	2087
2.	213,5	2041
3.	237	2011
4.	208	1937.

Bei Vergleichung der zweiten und dritten Beobachtung findet sich das Ungehörige, dass die grössere Geschwindigkeit mit dem

*) Hier zeigt sich am deutlichsten, wie viel günstigere Resultate zu erwarten ständen, wenn das Kymographion als Druckmesser benutzt würde. Ich habe mit Hülfe desselben ebenfalls Versuche angestellt, aber nach einer andern Methode, wovon in Cap. IX das Weitere.

geringeren Drucke zusammenfällt; dies kann in vorliegendem Falle die Folge kleiner Beobachtungsfehler sein.

Ich nehme an, dass man bei Bestimmung der zusammenfallenden Werthe von v und w sich um $\frac{1}{20}$ in der Schätzung jedes dieser Werthe irren könne, was gewiss keine Uebertreibung der möglichen Beobachtungsfehler ist, und corrigire nun die vorher verzeichnete Beobachtungsreihe, wie folgt:

Beobachtung	Stromschnelle	Blutdruck
1.	235	2139
2.	224	1980,2
3.	231	2081
4.	213	1826.

Für diese Werthe passen absolut die Coëfficienten:

$$a = 0{,}02399\,;\quad b = 3{,}467.$$

Hieraus ergiebt sich, dass die am Pferde angestellten Beobachtungen zwar nicht für, aber auch nicht gegen die Gültigkeit der hydrodynamischen Gesetze angeführt werden können.

§ 116. Sehr häufig liegen von den verschiedenen Beobachtungen nur 2 so weit in den Zahlenwerthen aus einander, dass an ein Berechnen der Coëfficienten zu denken ist. Derartige Beobachtungen sind insofern werthlos, als die Coëfficienten dann zu den 2 Fällen zwar absolut passen müssen, aber fraglich bleibt, ob sie auch zur Berechnung anderweitiger Fälle geeignet sein würden. Indess dürften selbst derartige Fälle unter Umständen eine gewisse Brauchbarkeit haben.

Beobachtungen an einem Hunde ergaben:

1. $v = 250$ Mill. $\quad w = 1782$ Mill.
2. $v = 294$ » $\quad w = 2313{,}9$ »

Hieraus ergeben sich die Coëfficienten:

$$a = 0{,}0168\,;\quad b = 2{,}9275.$$

Da die Grösse der Coëfficienten von den Widerstandsursachen, letztere aber in einem Gefässsysteme von der Organisation abhängen, welche in derselben Thierart in analoger Weise ausgeführt ist, so hat es einige Wahrscheinlichkeit für sich, dass bei

Individuen gleicher Art die Widerstandscoëfficienten nicht eben sehr verschieden ausfallen werden.

Von dieser Voraussetzung ausgehend, könnten wir die gefundenen Coëfficienten auch an Beobachtungen prüfen, welche an anderen Hunden angestellt wurden. Ich besitze eine Anzahl solcher vereinzelter Beobachtungen, welche eben, weil sie einzeln dastehen, zur Aufsuchung der Widerstandscoëfficienten nicht brauchbar waren. Die nachstehende Tabelle enthält eine Probe, in wie weit die vorhergefundenen Coëfficienten a und b auch auf andere Individuen passen.

im Hunde	Nach Beobachtung ist		Nach Berechnung ist	Fehler
	die Stromschnelle	der Widerstand	der Widerstand	der Rechnung
A	257	1897	1862	$-\frac{1}{54}$
B	280	2106	2137	$+\frac{1}{65}$
C	267	1809	1979	$+\frac{1}{11}$
D_4°	203	1671	1287	$-\frac{1}{4}$
	260	1902	1897	$-\frac{1}{380}$
E	249	2565	1771	$-\frac{1}{3}$
F	239	1683	1659	$-\frac{1}{70}$

Man sieht hieraus, dass die Coëfficienten zu der Mehrzahl der Beobachtungen so ziemlich passen, nur geben sie im Allgemeinen etwas zu geringe Druckwerthe.

§ 117. Da die Berechnung der unbekannten Grössen a und b nur dann brauchbare Resultate geben kann, wenn die Gleichungen, aus welchen sie entwickelt werden, sehr verschiedene Werthe enthalten, so versuchte ich durch wiederholte Aderlässe die nöthigen Differenzen in den Grössen von w und v künstlich herbeizuführen. Eine derartige Versuchsreihe an einem Hunde war folgende.

1. Beobachtung. Pulsfrequenz 120, Blutdruck 2106 Mill., Geschwindigkeit der Blutbewegung 280 Mill.

2. Beobachtung. Es werden 54 Gramm. Blut gelassen; Puls 132; Blutdruck 1957 Millim.; Stromschnelle 259 Millim.

3. Beobachtung. Es werden 79 Gramm. Blut gelassen; Blutdruck 1728 Millim.; Geschwindigkeit 186,66 Millim.

4. Beobachtung. Aderlass von 86,5 Gramm. veranstaltet; Puls 186; Blutdruck 756 Millim.; Geschwindigkeit 88,4 Millim.

5. Beobachtung. 76 Gramm Blut gelassen; Blutdruck 405 Millim.; Geschwindigkeit 48 Millim.

Versucht man diese Beobachtungen zu berechnen, so wird a negativ, was mit der Bedeutung der Widerstandscoëfficienten in unverkennbarem Widerspruch steht.

Benutzt man die im vorigen Paragraphen an einem anderen Hunde ermittelten Coëfficienten, um aus den Geschwindigkeiten die Widerstände zu berechnen, so ergiebt sich folgendes Resultat:

Beobachtung	Geschwindigkeit	Widerstände beobachtet	Widerstände berechnet	Rechnungsfehler
1.	280 Mill.	2106 Mill.	2137 Mill.	$+\frac{1}{65}$
2.	259 »	1957 »	1729 »	$-\frac{1}{8,6}$
3.	186,66 »	1728 »	955 »	$-\frac{1}{2,2}$
4.	88,4 »	756 »	390 »	$-\frac{1}{2,07}$
5.	48 »	405 »	199 »	$-\frac{1}{1,96}$.

Die Coëfficienten sind also für den ersten Fall, wo noch kein Blut gelassen war, eher zu gross als zu klein, für alle folgenden Fälle sind sie dagegen zu klein, und zwar genügen sie um so weniger, jemehr dem Thiere Blut entzogen worden ist.

Der Grund scheint dieser: In Folge der Aderlässe contrahirt sich die Gefässhöhle und setzt der Bewegung des Blutes einen grösseren Widerstand entgegen. In der Formel $w = av^2 + bv$ enthalten die Coëfficienten auch den vom Durchmesser ausgehenden Widerstand; indem sich also der Durchmesser der Gefäss-

höhle in Folge der Blutverluste contrahirt, müssen die Coëfficienten sich nothwendig ändern, sie müssen mit dem wachsenden Widerstande grösser werden.

Coëfficienten, welche von der Weite der Röhren unabhängig sind, haben wir dagegen in der Formel

$$w = \frac{4l}{d}\left(\alpha\frac{v^2}{4g} + \beta\frac{v}{\sqrt{d}}\right)^{*)}$$

welche, wenn wir die Länge $l = 1$ setzen, lautet:

$$w = \frac{4}{d}\left(\alpha\frac{v^2}{4g} + \beta\frac{v}{\sqrt{d}}\right)$$

In dieser Formel ist nämlich der Einfluss der Röhrenweite auf die Coëfficienten dadurch eliminirt, dass d als gemessener Werth besonders in Rechnung kommt.

In meinen 5 Beobachtungen ändert sich mit jedem Aderlasse die Durchschnittsfläche F der Gefässe in derselben Proportion, wie sich die Blutmenge B ändert, also:

$$F : F' = B : B'.$$

Nun verhalten sich aber die Kreisflächen wie die Quadrate der Diameter, also:

$$d^2 : d'^2 = B : B'$$

$$\text{und} \quad d : d' = \sqrt{B} : \sqrt{B'}$$

oder, wenn wir das ursprünglich im Thiere vorhandene Blut $B = 1$ setzen und das Verhältniss der verminderten Blutmenge B' zur ursprünglich vorhandenen $= R$,

$$d : d' = 1 : \sqrt{R} = 1 : \varrho.$$

Nun hatten wir:

$$w = \frac{4}{d}\left(\alpha\frac{v^2}{4g} + \beta\frac{v}{\sqrt{d}}\right)$$

also, wenn wir $d = 1$ setzen:

$$w = \alpha\frac{v^2}{g} + 4\beta v \ldots\ldots\ldots I.$$

---

*) Vergl. § 13.

$$w' = \alpha \frac{v'^2}{g\varrho} + \beta \frac{4v'}{\varrho\sqrt{\varrho}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad II.$$

Durch Elimination aus *I.* und *II.* findet man:

$$\beta = \frac{wv'^2 - \varrho w'v^2}{4vv'^2 - \frac{4v'v^2}{\sqrt{\varrho}}} \quad *)$$

und da nach Gleichung *I.* $w - 4v\beta = \alpha \frac{v^2}{g}$

so ist $\alpha = \left(\frac{(w - 4v\beta)g}{v^2}\right)$

womit die Formeln zum Aufsuchen der Coëfficienten gegeben sind.

Der Hund wog 9100 Gramm. Nehmen wir an, derselbe habe nach sämmtlichen Aderlässen, im Betrage von 295,5 Gramm., in der 5. Beobachtung noch $950 - 295{,}5 = \frac{654{,}5}{950}$ seiner ursprünglichen Blutmasse, welches Verhältniss $= R$ ist.

Benutzt man nun für w, w' und v, v' die in der ersten und fünften Beobachtung gefundenen Werthe, um nach Anleitung der Gleichungen *VII.* und *VIII.* die Coëfficienten α und β zu suchen, so erhält man:

$$\alpha = 23{,}618; \quad \beta = 1{,}5423.$$

Berechnet man mit diesen Coëfficienten aus den beobachteten

---

*) Es ist nämlich:

$$\frac{wv'^2}{g\varrho} = \alpha \frac{v^2v'^2}{gg\varrho} + \beta \frac{4v'^2v}{g\varrho}$$

$$\frac{w'v^2}{g} = \alpha \frac{v^2v'^2}{gg\varrho} + \beta \frac{4v^2v'}{g\varrho\sqrt{\varrho}}$$

$$\frac{wv'^2}{g\varrho} - \frac{w'v^2}{g} = \beta \frac{4v'^2v}{g\varrho} - \beta \frac{4v^2v'}{g\varrho\sqrt{\varrho}}$$

$$wv'^2 - \varrho w'v^2 = \beta\left(4v'^2v - \frac{4v^2v'}{\sqrt{\varrho}}\right)$$

Geschwindigkeiten die Druckhöhen oder Widerstände, und zwar für die erste Beobachtung nach Gl. *I.*, wie sich von selbst versteht, für die übrigen Beobachtungen dagegen nach Gl. *II.*, so erhält man folgende Resultate:

Beobachtung	w beobachtet	w' berechnet	Rechnungsfehler
1.	2106 Mill.	2106 Mill.	0
2.	1957 »	2002,9 »	$+\frac{1}{43}$
3.	1728 »	1690,6 »	$-\frac{1}{46}$
4.	756 »	706,9 »	$-\frac{1}{15}$
5.	405 »	405 »	0.

Der Fehler beträgt also im Mittel nur 0,022! Diese kaum zu erwartende Uebereinstimmung der Erfahrung und Theorie kann für die Brauchbarkeit der letzteren nur das beste Zeugniss ablegen, ja es würde sogar der Grad der Uebereinstimmung mit Hinsicht auf die möglichen Beobachtungsfehler verdächtig erscheinen müssen, wenn nicht der Einfluss der letzteren durch günstige Nebenumstände ausserordentlich vermindert wäre.

Diese Verminderung entsteht einmal durch die Langsamkeit der Blutbewegung, aber weit mehr noch durch das fast gänzliche Verschwinden der Oscillationen im Druckmesser, wenn reichlich zur Ader gelassen wird.

Schliesslich ist zu bemerken, dass die Annahme von 950 Gr. für die ursprüngliche Blutmenge auf einem langen hin und her Rechnen beruht, wobei ich eine Menge grössere und kleinere Werthe versucht und als ungeeignet für meine theoretischen Zwecke verworfen habe. Es passt dieses Quantum zur Aufstellung geeigneter Coëfficienten besser als die Annahme von 1000 Gr., und besser als die Supposition von 900 Gr. Bei fortgesetztem Suchen hätte sich vielleicht ein noch etwas passenderer Werth finden lassen. *)

*) Es könnte scheinen, dass hiermit auch eine Methode zur Bestimmung der Blutmenge gefunden sei. Da nämlich die Annahme, der Hund habe 950 Gramm. Blut besessen, auf Coëfficienten führt, welche 5 weit aus einander liegende Beobachtungen mit grosser Genauigkeit zu berechnen ge-

§ 118. Nach allen diesen Erfahrungen halte ich mich für vollkommen berechtigt anzunehmen, dass Druck und Stromschnelle auch in den Blutgefässen eines lebenden Thieres den Gesetzen unterliegen, welche sich bei Bewegung von Flüssigkeiten durch starre Röhren geltend machen. Um die Zuverlässigkeit dieser Annahme vollkommen zu würdigen, hat man sich an den ganzen Gang meiner Untersuchungen und nicht etwa blos an die schwierigen und vielen störenden Einflüssen unterworfenen Beobachtungen des gegenwärtigen Abschnittes zu halten. Wir sind von den einfachsten Verhältnissen, unter welchen Flüssigkeiten durch Röhren fliessen können, ausgegangen, nämlich von der Betrachtung einfacher, starrer, gleichmässig weiter Röhren; wir sind dann zu immer complicirteren Verhältnissen übergegangen, zu Röhren von ungleichem Kaliber, zu verästelten Röhren, zu elastischen Schläuchen, durch welche das Wasser stossweise getrieben wurde, und haben in allen diesen höchst verschiedenen Fällen dasselbe Gesetz anwendbar gefunden. Meines Erachtens folgt hieraus mit unabweislicher Consequenz, dass das gesetzliche Verhältniss zwischen Druck und Stromschnelle auch für die Physik des Kreislaufs Gültigkeit habe. Directe Experimente am Thierkörper bewiesen endlich, dass die vorkommenden Erscheinungen mit unseren Voraussetzungen im Einklang sind.

---

statten, so scheint es auf den ersten Anblick, die Annahme dieser Blutmenge sei durch die Uebereinstimmung zwischen Beobachtungen und Rechnung vollkommen gerechtfertigt. Indess ist zu bemerken, dass der Versuch streng genommen doch nur beweist, dass in einem lebenden Thiere das Verhältniss der Geschwindigkeit der Blutbewegung zum Blutdrucke von der Formel $w = \frac{4}{d}\left(\alpha \frac{v^2}{4g} + \beta \frac{v}{\sqrt{d}}\right)$ abhängt, wo d den Durchmesser der Gefässe bedeutet. Dem Versuche zu Folge ist klar, dass sich der Gefässdurchmesser nach Proportion der Aderlässe vermindert habe, aber es ist nicht erwiesen, dass in allen Theilen des Gefässsystems die Contraction dieselbe gewesen. Hätte der Hund von 9100 Gr. Gewicht nur 950 Gr. Blut besessen, so hätte die Blutmenge nur $\frac{1}{10}$ des Körpergewichtes betragen, was wahrscheinlich nicht ausreicht. Ich vermuthe, dass die Haargefässe sich in Folge der Blutverluste nur wenig contrahirt haben.

Zu warnen ist nur vor dem Missverständnisse, als habe die Formel $w = av^2 + bv$ eine absolute Gültigkeit. Der Theorie nach sollen die Widerstandscoëfficienten Constanten sein, aber schon im ersten Abschnitt ist mehrfach darauf hingedeutet worden, dass die Beständigkeit derselben nur innerhalb einer gewissen Breite vorkommender Fälle statuirbar sei. Uebrigens versteht es sich für Jeden, welcher dem Gange der Untersuchung gefolgt ist, von selbst, dass von einer Beständigkeit der Widerstandscoëfficienten nur so lange die Rede sein kann, als die Bedingungen, welche den Widerstand veranlassen, unverändert bleiben. Offenbar sind aber mehrere Factoren des Widerstandes, z. B. die Weite der Gefässhöhle und die Zähigkeit des Blutes, nicht unbeträchtlichen Schwankungen unterworfen, wonach dann auch die Werthe der Coëfficienten sich ändern müssen.

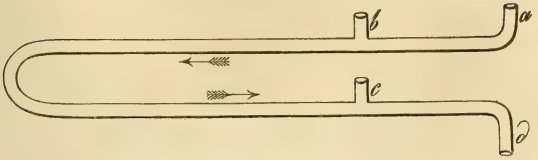
Dass die eben erwähnte hydrostatische Formel auf die Blutbewegung nicht vollständig passe, wird schon durch die Gegenwart der Haargefässe angedeutet, insofern Capillaren andere Widerstandsverhältnisse zeigen, als weitere Röhren, und die Formel $w = av^2 + bv$ nur für letztere berechnet ist. Dieser Umstand kann nur zur Vorsicht bei Benutzung der Formel auffordern, nicht aber veranlassen, sie zu verwerfen. Eine approximative Geltung derselben ist durch meine Beobachtungen direct erwiesen, und diese kann durch keine, auch noch so gerechtfertigte theoretische Betrachtung erschüttert werden.

Cap. IX.

Darstellung einer für hämodynamische Untersuchungen wichtigen Methode.

---

§ 119. Ich habe schon in einem früheren Abschnitte beiläufig eines Versuches gedacht, welcher einer ausführlicheren Besprechung werth scheint.



Wenn man eine schleifenförmig gebogene Glasröhre, *a b c d*, mit dem einen Ende in die centrale Mündung einer durchschnittenen Arterie einbindet und mit dem anderen in die peripherische Mündung, so muss nach hydrodynamischen Gesetzen im Verlaufe der Röhre der Blutdruck stetig abnehmen. Gesetzt, das Blut flösse in der Richtung, wie die Buchstaben folgen, durch die Röhre, so müsste ein bei *b* errichteter Druckmesser einen höheren Druck ergeben, als ein bei *c* befindlicher.

Dass die Erfahrung dies bestätigt, ist früher schon angeführt worden, aber es ist nun weiter zu bemerken, dass die Druckdifferenz, welche zwischen den Punkten *b* und *c* eintritt, wiederum nichts Anderes als eine Function der Geschwindigkeit ist. Es wird dies auch keines besonderen Beweises bedürfen, da in einem früheren Abschnitte im Allgemeinen erwiesen worden ist, wie die Druckdifferenz, welche zwischen zwei Punkten einer Röhre eintritt, wenn durch dieselbe ein Fluidum strömt, nichts Anderes als das Mass des Widerstandes ist, welcher in dem durch die beiden Punkte begrenzten Röhrenabschnitte statt findet.

Wir haben daher in früheren Versuchen, wo wir Wasser durch Röhren strömen liessen, diese Druckdifferenz nach der Formel $w = av^2 + bv$ berechnen können, und es wird der Mühe lohnen nachzuforschen, ob dies auch dann möglich sei, wenn lebendiges Blut durch die Röhre fliesst.

Ich habe mich zur Anstellung dieser Versuche eines Hämodromometers von 1,30 Meter Länge und 3 Millimeter Durchmesser im Lichten bedient. Die Punkte *b* und *c*, deren Druckdifferenz geprüft werden sollte, lagen 900 Millimeter aus einander, jeder

200 Millimeter von der Eingangs- und respective Ausgangsmündung des Instrumentes entfernt und jeder mit einem Kymographion in Verbindung gebracht. Es wurden also für beide Punkte isochrone Curven gezogen, und der Mitteldruck wurde auf die früher erörterte Weise, durch Wägung der Curven, ermittelt (§ 87).

Da die Berechnung zweier Unbekannten in unserer Formel nur möglich ist, wenn verschiedene Werthe für w und v vorliegen, so versteht es sich von selbst, dass mehrere Beobachtungen angestellt werden mussten; aber aus Gründen, welche ich später erörtern werde, wurde in jeder Versuchsreihe das erste Experiment nach einem anderen Prinzipe angestellt, als alle übrigen. Ich verfuhr nämlich auf folgende Weise. —

Erstes Experiment. Der Hämodromometer wurde, mit Wasser gefüllt, einerseits in das centrale, andererseits in das peripherische Ende einer durchschnittenen Arterie eingebunden. Nachdem dies geschehen, wurde der Hahn des Instrumentes so gestellt, dass das Blut durch die Glasröhre lief. Gleichzeitig begannen die Wellenmesser zu spielen und die bezüglichen Druckcurven für die Zeit einer Cylinderumdrehung aufzuzeichnen. Die Gewinnung zweier isochronen Curven zur Ermittlung der Druckdifferenz war aber der einzige Zweck der ersten Beobachtung, welche daher nach einem Umlaufe des Cylinders abgebrochen wurde.

Bei allen folgenden Beobachtungen, deren mindestens zwei noch nöthig waren, wurde ein anderes Prinzip befolgt. Nachdem der Hämodromometer gereinigt worden war, was zwischen zwei Versuchen immer geschehen muss, wurde derselbe nur in die centrale Mündung der Arterie eingeführt. Nach Eröffnung des Hahnes lief also das Blut durch die auf der einen Seite offene Glasröhre ins Freie und wurde in einem untergehaltenen Becken, während einer genau bestimmten Zeit, gesammelt und später gewogen. Da nun die Durchschnittsfläche der Röhre bekannt war, so brauchte man nur mit dieser in die Blutmasse zu divi-

diren, um die Geschwindigkeit der Bewegung für die Dauer der Beobachtung zu erhalten. Dividirte man schliesslich den Werth dieser Geschwindigkeit mit der Anzahl der Secunden, welche der Versuch gedauert hatte, so erhielt man die Stromschnelle für die Dauer einer Secunde, $= v$. Das zu diesem v gehörige w ergab sich aber durch Auswägung der Druckcurven, welche mit Hülfe des Kymographion auch für diesen, wie für jeden folgenden Fall verzeichnet wurden.

Um nun verschiedene Werthe für w und v zu gewinnen, wurde zwischen je zwei Versuchen der letzbeschriebenen Art jedes Mal eine entsprechende Masse Blut abgezogen. Der Blutverlust vermindert, wie früher gezeigt wurde, sowohl den Blutdruck als auch die Stromschnelle, und so ergab sich mit jedem neuen Versuche ein neuer Fall zur Berechnung der Coëfficienten.

Um möglichen Missverständnissen vorzubeugen, wird es nothwendig sein, auf den Unterschied der eben erörterten Versuche von einem früheren aufmerksam zu machen, wo die Werthe von w und v ebenfalls durch Aderlässe verändert wurden. In jenem früheren Versuche liessen sich die Coëfficienten nur dann berechnen, wenn auf die Contraction der Gefässe Rücksicht genommen wurde, welche in Folge des Blutverlustes eintrat und welche die Widerstandsursachen im Gefässsysteme änderte. Im gegenwärtigen Falle erfolgt zwar diese Contraction ebenfalls, ist aber einflusslos. Die Druckdifferenz, welche dies Mal als w fungirt, hängt natürlich nur von den Widerstandsmomenten des Röhrenabschnittes zwischen b und c ab, und da die Glasröhre bei der Contraction nicht betheiligt ist, so kann das Verhältniss $\frac{w}{v}$ durch den Aderlass nicht verändert werden. Aus diesem Grunde war es auch nutzlos, die Quantitäten des abgezogenen Blutes anzumerken.

§ 120. Ich werde nun einige hierher gehörige Versuche ausführlich mittheilen, wobei ich nicht unerwähnt lassen will, dass ich mit diesen complicirten und schwierigen Experimenten wahr-

scheinlich nicht zu Stande gekommen wäre, wenn mir nicht durch die Assistenz meines werthen Freundes Ludwig aus Marburg noch ein Paar trefflich geübte Augen und Hände zu Diensten gestanden hätten.

Erste Versuchsreihe an einem Kalbe.

1. Beobachtung. Der Blutdruck ($= w$) im ersten Kymographion beträgt im Mittel der Beobachtungsdauer 139 Millimeter Quecksilber, der Druck im zweiten ($= w'$) 122,7 Millimet., demnach die Druckdifferenz $= 16{,}3$ Millimeter.

2. Beobachtung. $w = 86{,}9$ Millim., $w' = 38{,}1$ Millim., Druckdifferenz $= 48{,}8$ Millim., Blutabfluss in Zeit von 60 Uhrschlägen (à 0,4 Secunde) 141,6 Gramm., also $v = 835{,}1$ Millim.

3. Beobachtung. $w = 57{,}3$ Millim., $w' = 27{,}4$ Millim., Druckdifferenz $= 29{,}9$ Mill., $v = 765{,}5$.

4. Beobachtung. $w = 45{,}8$ Millim., $w' = 22$ Millim., Druckdifferenz $= 23{,}8$ Mill., $v = 576$ Mill.

5. Beobachtung. $w = 40{,}7$ Mill., $w' = 19{,}2$ Millim., Druckdifferenz $= 21{,}5$ Mill.

6. Beobachtung. Das abfliessende Blut hat sichtlich seine Farbe verändert und ist wässriger; $w = 25{,}6$ Millim., $w' = 12{,}7$ Millim., Druckdifferenz $= 12{,}9$ Mill., $v = 343{,}8$ Mill.

7. Beobachtung. Das Blut noch wässriger; $w = 21$ Mill., $w' = 10{,}5$ Mill., Druckdifferenz $= 10{,}5$ Millim., $v = 264{,}2$.

Wenn nun die Druckdifferenzen als Widerstandswerthe in die Formel $w = av^2 + bv$ eingeführt werden, so berechnet sich nach der Methode der kleinsten Quadrate:

$$a = 0{,}000033249 \text{ und } b = 0{,}023257.$$

In wie weit diese Coëfficienten der Beobachtung entsprechen, ergiebt sich aus folgender

Tabelle.

	beobachtete Werthe		berechneter Werth	Differenz der Beobachtung u. Rechnung
	w	v	v	
1.	16,3 Mill.	? Mill.	433 Mill.	—
2.	48,8 »	835 »	911,3 »	$+\frac{1}{11}$
3.	29,9 »	765 »	661 »	$-\frac{1}{7,4}$
4.	23,8 »	576,2 »	565,8 »	$-\frac{1}{57}$
5.	21,5 »	524,4 »	527,1 »	$+\frac{1}{175}$
6.	12,9 »	343,8 »	364,6 »	$+\frac{1}{15}$
7.	10,5 »	264,2 »	312,2 »	$+\frac{1}{5}$

mittlerer Fehler $= \frac{1}{20}$.

§ 121. Es scheint angemessen, ehe wir weiter gehen, zu fragen, was mit den Resultaten, die wir erlangt haben, gewonnen sei. Zunächst allerdings nur die Gewissheit, dass das Blut beim Ausfliessen aus der Glasröhre einem physikalischen Gesetze gehorchte.*) Die Kraft nämlich, mit welcher das Blut gegen die Wandungen der Röhre drückt, und die Schnelligkeit, mit welcher es ausfliesst, stehen unter einander in einem berechenbaren Verhältnisse. Dies steht im entschiedensten Widerspruch mit der Ansicht derjenigen, welche dem lebendigen Blute ein Vermögen der Selbstbewegung zuschreiben. Man könnte einwerfen wollen, das Blut in der Glasröhre sei kein lebendiges mehr, aber abgesehen von der Willkürlichkeit dieser Entgegnung,

*) Obschon Beobachtung und Rechnung nicht sonderlich zusammenstimmen, so kann doch die Gesetzlichkeit des Vorganges nicht in Zweifel gezogen werden. Die in der Tabelle verzeichneten Differenzen erklären sich grösstentheils aus den Veränderungen, welche während des Versuches in der Blutmischung eintraten. Mit der Dichtigkeit verändert sich die Adhäsion des Blutes und mit letzterer der Werth der Widerstandscoëfficienten, welche in der Rechnung als constant vorausgesetzt werden.

ist zu berücksichtigen, dass das jedenfalls lebendige Blut der Arterie und das präsumtiv todte der Glasröhre ein Continuum bilden, und dass die Quantität des Abflusses aus letzterer unmöglich eine gesetzlich bestimmte sein könnte, wenn die Quantität des Zuflusses aus ersterer nicht ebenfalls eine gesetzlich bestimmte wäre.

Das im vorigen Paragraphen gewonnene Resultat enthält eine beachtungswerthe Warnung für diejenigen, welche die organischen Vorgänge, statt aus den natürlichen Bedingungen, aus den angestrebten Zwecken erklären. So verweist der geistreiche Burdach auf die Thatsache, dass die neugeborenen Säugethiere sich aus dem zerrissenen Nabelstrange nicht verbluten, und nimmt an, dass das Blut in dem eben geborenen Thiere, gleich als ob es wüsste, dass es in den Nabelarterien nichts mehr zu schaffen habe, diese umgehe und eine neue, den präsenten Zwecken entsprechende Richtung einschlage. Unstreitig hat das Blut in meiner Glasröhre so wenig zu suchen, als in den Nabelarterien des Neugeborenen; es fliesst, allen organischen Zwecken zum Trotze, doch ab, weil die Glasröhre offen bleibt, und es fliesst aus den Nabelarterien nur darum nicht ab, weil diese sich schliessen.

Der zweite Gewinn der im vorigen Paragraphen gewonnenen Erfahrungen ist dieser, dass wir ein neues Mittel gefunden haben, die Geschwindigkeit des Blutes in den Adern der Thiere zu messen. Ist nämlich die Druckdifferenz zwischen zwei Punkten einer Arterie gegeben, so kann man die Stromschnelle berechnen, wenn die Widerstandscoëfficienten bekannt sind. Hiermit hängt es zusammen, dass ich in jeder Versuchsreihe die ersten Beobachtungen nach einem anderen Prinzipe anstelle, als alle folgenden (§ 119). Die erste Beobachtung hat keinen anderen Zweck, als die Druckdifferenz zwischen zwei Punkten einer Arterie oder vielmehr einer ihr substituirten Glasröhre kennen zu lernen, und wiederum suchen wir diese Druckdifferenz (in Beobachtung 1. der Tabelle = 16,3 Millim.) nur deshalb, um aus derselben mit Hülfe der Formel

$$v = -\frac{b}{2a} + \sqrt{\frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2}{4} + \frac{w}{a}}$$

die Stromschnelle in der Röhre und folglich auch in der Arterie, welcher sie substituirt ist, berechnen zu können.*) Die zweite Beobachtung und alle folgenden haben dagegen den Zweck, die Auffindung der beiden Unbekannten zu ermöglichen. Aus der Druckdifferenz von 16,3 Millim. Quecksilber berechnet sich nun die Blutgeschwindigkeit in der *Carotis* des Kalbes zu 433 Millim. für die Secunde, wie in der Tabelle angegeben ist.

§ 122. Obschon ich nicht Zeit gehabt habe, die Untersuchungen über diese Gegenstände in dem Grade zu vervielfältigen, als im Interesse der Sache zu wünschen wäre, so besitze ich doch noch einige Erfahrungen, welche im Folgenden Platz finden mögen.

Zweite Versuchsreihe an einem Hunde.

1. Beobachtung. $w = 138{,}2$ Mill., $w' = 128{,}6$ Millim. Druckdifferenz $= 9{,}6$ Mill.

2. Beobachtung. $w = 107{,}3$ Millim., $w' = 48{,}9$ Millim. Druckdifferenz $= 58{,}4$ Millim., $v = 980{,}7$ Millim.

3. Beobachtung. Gelang nur unvollständig, indem ein Kymographion im Gange gestört wurde, nachdem es eben erst angefangen, die Curve zu zeichnen. Die Druckdifferenz $= 53{,}5$ Mill., welche sich ergab, hat also nur für einen kurzen Theil des Versuches Gültigkeit; $v = 954{,}2$.

4. Beobachtung. $w = 83{,}2$ Mm., $w' = 40$ Mm., Druckdifferenz $= 43{,}2$ Mm., $v = 710{,}7$ Mm.

5. Beobachtung. $w = 65{,}3$ Mm. $w' = 34$ Mm., Druckdifferenz $= 31{,}3$ Mill., $v = 627{,}5$ Mm.

*) Auf die schon oben behandelte Frage, in wie weit Druck und Geschwindigkeit in der Arterie und in der ihr substituirten Glasröhre für gleich gelten können, will ich hier nicht zurückkommen, wohl aber wird sich in einem der nächstfolgenden §§ Gelegenheit finden, die noch bestehenden Zweifel aufzuklären.

Nun ist $a = 0{,}000015651$ und $b = 0{,}044802$.

Berechnet man mit Hülfe dieser Coëfficienten die Geschwindigkeiten aus den Widerständen, so erhält man:

Nach Beobachtung		nach Rechnung	Differenz
w	v	v	
9,6 Mill.	?	200,2 Mill.	— ?
58,4 »	980,7 Mill.	972,9 »	$-\frac{1}{123}$
53,5 »	954,2 »	906,8 »	$-\frac{1}{20}$
43,2 »	710,7 »	761,6 »	$+\frac{1}{14}$
31,3 »	627,5 »	580,9 »	$-\frac{1}{13}$

mittlere Differenz $\frac{1}{20}$.

Dritte Versuchsreihe an einem Hunde.

1. Beobachtung. $w = 132{,}8$ Mill., $w' = 120{,}8$ Mill., Druckdifferenz $= 12$ Mill.

2. Beobachtung. $w = 92$ Mill., $w' = 28$ Mill., Druckdifferenz $= 64$ Mill., $v = 849{,}8$ Mill.

3. Beobachtung. $w = 64{,}6$ Mill., $w' = 22$ Mill., Druckdifferenz $= 42{,}6$ Mill., $v = 639{,}7$ Mill.

Aus diesen Beobachtungen erhält man $a = 0{,}00004187$, $b = 0{,}03981$. Berechnet man mit Hülfe dieser Coëfficienten aus der Druckdifferenz der Beobachtung 1., $= 12$ Mill., die zugehörige Stromschnelle, so erhält man $v = 240{,}9$ Mill. Dieses Resultat hat die Wahrscheinlichkeit für sich. Eine Geschwindigkeit von 240,9 Mill. in der *Carotis* des Hundes fällt nämlich etwas unter den Mittelwerth, und eine solche geringere Geschwindigkeit musste erwartet werden, da auch der Blutdruck in der Kopfschlagader noch nicht die mittlere Höhe, nämlich nur 132,8 Mill. erreicht hatte.

§ 123. Wir haben also eine zweite Methode zur Ermittlung der Stromschnelle gefunden, und es fragt sich, ob diese oder die Messungen mit dem Hämodromometer den Vorzug verdienen. Ueber den Grad der Zuverlässigkeit meines Hämodromometers

habe ich mich bereits § 96 ausgesprochen. Es fand sich daselbst, dass bei Bestimmungen der Geschwindigkeit Irrungen im Werthe von $\frac{1}{25} - \frac{1}{20}$ erwartet werden durften. Was nun die neue Methode betrifft, wo wir die Geschwindigkeit des Blutes aus einer Druckdifferenz berechnen, so hängt dieselbe offenbar von zwei Umständen ab, nämlich von der Zuverlässigkeit der Coëfficienten und von der Genauigkeit der Messung jener Druckdifferenz, welche in der Formel für w eintritt.

In wie weit es bisher gelungen sei, genaue Widerstandscoëfficienten zu finden, ergiebt sich aus der ersten und zweiten Versuchsreihe. In beiden beträgt der Unterschied zwischen Beobachtung und Rechnung im Mittel $\frac{1}{20}$, und wenn in einzelnen Fällen die Differenz grösser ausfällt, so kann mit gutem Grunde angenommen werden, dass dies an zufälligen Störungen der freilich sehr schwierigen Beobachtungen liege. Ich zweifle nicht, dass es gelingen würde, durch gehörige Einübung aller bei dem Experimente betheiligten Personen und durch kleine Verbesserungen des Apparates noch genauere Coëfficienten zu erzielen. Dieselben werden abgeleitet aus der Formel $w = av^2 + bv$, es kommt also darauf an, die Beobachtungen über die zusammengehörigen Werthe w und v zu sichern. Nun wurde die Geschwindigkeit dadurch bestimmt, dass ich das Blut, welches während 60 Uhrschlägen (zu 0,4″) ablief, in einem Becken auffing und wog; wurde also beim Unterschieben und beim Wegnehmen des Beckens der rechte Zeitmoment jedes Mal nur um $\frac{1}{2}$ Uhrschlag gefälscht, so entstand ein Fehler von $\frac{1}{60}$. Es würde also vortheilhafter sein, den Versuch etwas länger fortzusetzen.

Der zweite erforderliche Werth, w, ist durch die Druckdifferenz gegeben, welche zwischen zwei Röhrenpunkten entsteht, deren Distanz 900 Mill. beträgt, und zwar dann entsteht, wenn das Blut aus der Ausflussöffnung der Röhre ins Freie fliesst. Der Werth w sinkt, wie die Tabellen zeigen, bisweilen auf 30 Mill. Quecksilber, und folglich standen die von dem Kymogra-

phion gezogenen Curven nur ungefähr 15 Mill. aus einander.*) Diese Differenz von 15 Mill. wurde durch Ausschneiden und Wiegen der auf Papier gezeichneten Curven ermittelt; hierbei konnte leicht ein Fehler von $\frac{1}{30}$ vorkommen, wenn die Scheere beim Ausschneiden nicht haarscharf der gezogenen Wellenlinie folgte. Es ist einleuchtend, dass dieser Fehler sich in demselben Masse vermindert, als w an Werth zunimmt. Es würden also genauere Coëfficienten zu erlangen sein, wenn man für grössere Druckdifferenzen sorgte. Dies würde in der von mir benutzten Glasröhre von 1,30 Meter Länge möglich gewesen sein, wenn ich die Druckmesser, statt 900, 1100 Millimeter von einander entfernt oder eine etwas engere Röhre gewählt hätte. Aus Allem ergiebt sich, dass genauere Widerstandscoëfficienten wohl zu erhalten sein würden, wie auch die von mir gewonnenen schon ganz leidlich passen.

Um aber die Geschwindigkeit des Blutes im lebenden Thiere zu ermitteln, bedarf es ausser den Coëfficienten noch eines Werthes w, nämlich jener Druckdifferenz, welche durch jede erste Beobachtung unserer 3 Versuchsreihen gegeben ist. Diese Druckdifferenz war unter allen Umständen sehr klein (9—12 Millim.), wie natürlich, weil das Blut unter diesen Umständen viel langsamer fliessen musste, als unter denen, welche der zweiten und allen folgenden Beobachtungen zu Grunde liegen.

Bei einer Druckdifferenz von 9—12 Millimeter ist aber ein Beobachtungsfehler von $\frac{1}{10}$ leicht möglich, und folglich kann auch die auf Grundlage dieses Werthes berechnete Stromschnelle auf keine grosse Genauigkeit Anspruch machen. Setzen wir beispielsweise, es hätte sich durch Beobachtungsfehler die Druckdifferenz 9 für 10 gefunden, und man berechnete mit Hülfe der Widerstandscoëfficienten $a = 0{,}000033249$ und $b = 0{,}023257$

*) Im Kymographion hebt sich der Schwimmer nur um so viel, als das Quecksilber in dem einen Schenkel des Druckmessers steigt. Dies giebt erst den halben Druck, da das Quecksilber des andern Schenkels in gleichem Masse gefallen ist.

die Stromschnelle, so würde man $v' = 277{,}2$ für $v = 300{,}7$ erhalten, also einen Fehler von $\frac{1}{13}$. Hieraus ergiebt sich, dass die zweite Methode zur Bestimmung der Geschwindigkeit des Blutes minder genau ist als die frühere, wo die Wegstrecke, welche das Blut in einer gegebenen Zeit im Hämodromometer zurücklegt, direct gemessen wurde.

Demohngeachtet dürfte die neue Methode einer weiteren Berücksichtigung wohl werth sein, einerseits, weil sie einer gewissen Vervollkommnung noch fähig scheint, andererseits, weil sie sich unter Umständen anwenden lässt, wo der Hämodromometer unbrauchbar ist.*) Das Messingstück dieses Instrumentes, welches die beiden Hähne trägt (Tab. III Fig. 1 *A*), nimmt einen nicht unbedeutenden Raum ein und erlaubt die Benutzung des Apparates nur da, wo man aus dem Blutgefässe, in welches er eingeführt werden soll, ein Stück von ungefähr $2\frac{1}{2}$ Zoll Länge ausschneiden kann. Bei der neuen Methode bedarf die hufeisenförmig gebogene Glasröhre jenes Messingsstücks mit Hähnen nicht; man kann daher die Enden derselben beliebig nah an einander bringen, und kann deshalb das Instrument auch bei sehr kleinen Wunden anlegen.

Zu dem eben erörterten kleinen Vorzuge des neuen Instrumentes kommt noch ein grösserer, der nämlich, dass die mit demselben gewonnenen Resultate, wenn auch nie sehr präcis, doch andererseits nie sehr falsch ausfallen. Der Zusammenhang ist folgender. Da das Verhältniss von $w : v$ nun einmal ein gesetzliches ist, so muss eine Veränderung der Widerstandsursachen eine entsprechende Veränderung der Geschwindigkeit nach sich ziehn; es muss beispielsweise bei einer theilweisen Verstopfung der Glasröhre durch Faserstoffgerinsel, oder bei

*) Die mögliche Vervollkommnung bezieht sich auf Vergrösserung der Druckdifferenzen, welche mit der Entfernung der Druckmesser von einander und mit der Enge der Glasröhre zunehmen. Wie weit die hierher bezüglichen Veränderungen mit Vortheil ausgedehnt werden können, bleibt noch zu ermitteln.

einem Drucke auf das Gefäss, in welches sie eingeführt ist, die Geschwindigkeit des Blutstroms abnehmen. Gesetzt, dieser Fall träte im Hämodromometer ein, so erhielte man einen zu geringen Werth für v und doch kein Mittel, das Anormale dieser Verminderung wahrzunehmen. Anders dagegen bei Benutzung der neuen Methode. Aendert sich die Geschwindigkeit, so ändert sich unvermeidlicher Weise auch die Druckdifferenz als Function jener. Sollte v fallen, so würde auch der Werth der Seitendruckdifferenz abnehmen und andeuten, dass man es mit einer Blutbewegung unter behindernden Umständen zu thun habe. Betrachtet man den Unterschied des Drucks in beiden Manometern als w, so kann, eben weil dieses w eine Function von v ist, das Verhältniss von $w : v$ im Versuche keine wesentliche Fälschung erleiden, woraus sich beiläufig ergiebt, dass die Anwendbarkeit der hydrodynamischen Formeln auf die Verhältnisse des Kreislaufs durch die zweite Methode bei Weitem am schlagendsten erwiesen wird.

§ 124. Neue interessante Aussichten eröffnen sich, wenn wir die Natur der Coëfficienten näher betrachten, welche wir in den drei besprochenen Versuchsreihen ermittelt haben. Diese Coëfficienten stehen unter dem Einflusse der Widerstandsursachen, sie sind constant oder veränderlich nach Massgabe dieser. Da in allen Versuchen, die wir anstellten, dieselbe gebogene Glasröhre angewendet wurde, so konnte von einer Verschiedenheit der Widerstandsmomente in dieser nicht die Rede sein, die Coëfficienten hätten also mit Bezug auf das benutzte Instrument constant sein sollen, und doch waren sie dies nicht, d. h. wir haben in jeder Versuchsreihe andere Coëfficienten gefunden. Es muss sich also doch etwas in den Widerstandsursachen geändert haben, und da das Veränderliche nicht im Apparate lag, so musste es in dem Fluidum liegen, welches durch denselben hindurchströmte. In der That bleibt nichts übrig als anzunehmen, dass das Blut der verschiedenen Thiere, mit welchem wir experimentirten, einen verschiedenen Grad der Adhäsion gegen die

Glasröhre ausgeübt habe, und in diesem Sinne kann man sagen, dass die neue Methode, welche ich im Obigen geschildert habe, die Adhäsionscoëfficienten des Blutes in verschiedenen Thieren kennen lehre.

Natürlich können die wenigen Beobachtungen, welche im Vorhergehenden angestellt wurden, noch keine positiven Aufschlüsse gewähren, wohl aber können sie benutzt werden, um den Gang der Untersuchung ins Klare zu bringen.

Wir fanden für das Kalb den Coëfficienten $a = 0{,}000033249$ und $b = 0{,}0232573$. Nun lässt sich mit Hülfe der Formel $w = av^2 + bv$ berechnen, welche Druckdifferenz in unserer Glasröhre entstehen müsste, wenn das Blut mit einer Geschwindigkeit von 300 Millim. in einer Secunde durchströmte. Die Rechnung ergiebt eine Druckdifferenz von 9,97 Mill.

Genau dieselbe Druckdifferenz sollte nun entstehen, wenn das Blut eines Hundes mit 300 Mill. Schnelligkeit durch den betreffenden Apparat strömte, statt dessen ergiebt die Rechnung für den ersten Hund

$$0{,}000015651 . 300^2 + 0{,}0448030 . 300 = 14{,}85 \text{ Mill.}$$

und für den zweiten Hund:

$$0{,}0000420 . 300^2 + 0{,}03970 . 300 = 15{,}69 \text{ Mill.}$$

Also bei einer Geschwindigkeit von 300 Millim. in der Secunde verhält sich in 3 verschiedenen Thieren der durch die Adhäsion des Blutes bedingte Widerstand wie 9,97 : 14,85 : 15,69, wobei bemerkenswerth scheint, dass in den beiden Hunden die Adhäsion sich fast gleich mächtig und annäherungsweise $\frac{1}{3}$ stärker als im Kalbe erweist.

Es würde interessant sein, dieser Parallele eine weitere Ausdehnung zu geben und namentlich auch kaltblütige Thiere mit in den Vergleich zu ziehen. Letzteres würde freilich nur da möglich sein, wo Individuen der grössten Arten zu haben sind, denn die Blutarmuth der Amphibien und Fische macht bei Thieren von nur mittlerer Grösse den Versuch unausführbar.

Nicht uninteressant schien es mir, die Adhäsionscoëfficienten

des Blutes mit denen des Wassers zu vergleichen, um so mehr, als der berühmte Young in einer theoretischen Arbeit über den Blutdruck von der Voraussetzung ausgeht, dass der Widerstand des Blutes 4 Mal grösser sei als der des Wassers.*)

Um einen Vergleich anstellen zu können, musste ich Wasser durch denselben Apparat fliessen lassen, durch welchen in meinen Versuchen an Thieren das Blut strömte; das Verhältniss $\frac{w}{v}$ musste ermittelt und aus diesen die doppelte Unbekannte abgeleitet werden. Dies geschah, vollkommen wie oben beschrieben, in folgender Versuchsreihe mit frischem Brunnenwasser von ungefähr 9^0 R. Wärme.

Beobachtung 1. Druckdifferenz $(w) = 52{,}5$ Mill. Quecksilber; $v = 1096{,}4$ Mill.

Beobachtung 2. $w = 37{,}9$ Mill.; $v = 919{,}3$ Mill.

Beobachtung 3. $w = 27{,}8$ Mill.; $v = 745{,}9$ Mill.

Beobachtung 4. $w = 24{,}4$ Mill.; $v = 641$ Mill.

Nun ist $a = 0{,}0000257806$; $b = 0{,}0189594$.

Als Probe für die Zuverlässigkeit der Coëfficienten dient folgende Tabelle.

	beobachtete Werthe		berechneter Werth	Differenz
	v	w	w'	
1.	1096,4 Mill.	52,5 Mill.	51,8 Mill.	$\frac{1}{75}$
2.	919,3 »	37,9 »	39,2 »	$\frac{1}{29}$
3.	745,9 »	27,8 »	28,5 »	$\frac{1}{39}$
4.	641 »	24,4 »	22,8 »	$\frac{1}{16}$.

Wenn jetzt die Druckdifferenz für eine Geschwindigkeit von 300 Mill. gesucht wird, so ergiebt die Rechnung $w = 8{,}008$,

*) *The Croonian lecture on the function of the heart and the arteries. Philos. transact.* 1809. Ich will hier gleich bemerken, dass allem Anscheine nach Young sich über die Fragstellung nicht ganz klar war. Die Annahme, das Blut erfahre 4 Mal mehr Hemmnisse als das Wasser, hat im Grunde gar keinen Sinn, es muss hinzugefügt werden, bei welcher Stromschnelle dies gelte.

d. h. also: das Blut unserer beiden Hunde erzeugt bei $v = 300$ M. annäherungsweise doppelt so viel, das Blut des Kalbes nur $\frac{1}{5}$ mehr Adhäsion als frisches Wasser.

Freilich ist hier Blut von 30° R. mit Wasser von ungefähr 9° R. zusammengestellt, was keinen passenden Vergleich abgiebt, da die Temperatur von wesentlichem Einfluss auf den Widerstand ist.

Aus diesem Grunde wiederholte ich den Versuch mit Wasser von 30° R. Wärme, muss aber bevorworten, dass mein Apparat nicht in der Weise eingerichtet war, dass ich für den Temperaturgrad mit Sicherheit einstehen könnte. Möglicher Weise war das Wasser 1—2 Grad kühler, als ich beabsichtigte.

Aus den Versuchen berechnete ich folgende Coëfficienten: $a = 0{,}00003280$ und $b = 0{,}002715$. Hiernach gehört zu einer Geschwindigkeit von 300 Mill. eine Druckdifferenz von 3,76 Mill. Bei gleichen Temperaturen und einer Geschwindigkeit von 300 Mill. würde also die Adhäsion des Hundeblutes annäherungsweise 4 Mal grösser sein als die des Wassers, die des Kalbsblutes nur etwa $2\frac{1}{2}$ Mal grösser.

Ich habe mich hinreichend darüber ausgesprochen, dass diese Werthe nur ungefähre Geltung haben können, und dass ich alle diese Rechnungen zunächst nur als Beispiele meines Verfahrens betrachte.

§ 125. Ein beiläufiger Nutzen der eben erörterten Untersuchungen besteht darin, die im Hämodromometer gelegenen Widerstandsmomente genauer kennen zu lehren. Es ist am gehörigen Orte gezeigt worden, dass das Blut durch den Hämodromometer langsamer fliesse, als es ohne die Gegenwart des Instrumentes durch die Ader geflossen sein würde. Desgleichen ist wahrscheinlich gemacht worden, dass die Verzögerung, welche die Blutbewegung in der langen Glasröhre erfahre, eine geringfügige sei. Ich werde jetzt dieser Ansicht dadurch eine neue Stütze geben, dass ich präcis nachweise, wie der von mir con-

struirte Geschwindigkeitsmesser die im Gefässsysteme bestehenden Widerstände nur wenig steigere.

In meinen Versuchen mit dem Hämodromometer befindet sich das Blut offenbar unter dem Einflusse eines doppelten Widerstandes, nämlich erstens des normalen, welcher vom Gefässsysteme ausgeht, und zweitens eines anormalen, welcher durch das Instrument bedingt wird. Dieser anormale und accessorische Widerstand, welcher als Ursache der verzögerten Blutbewegung unsere besondere Aufmerksamkeit verdient, lässt sich mit Hülfe der schon gemachten Beobachtungen genau berechnen. Wir haben Versuche über die Grösse des Widerstandes gemacht, welcher entsteht, wenn das Blut durch den Hämodromometer ins Freie strömt. Der Druck, welcher bei einem solchen Versuche im Hämodromometer beobachtet wird, beruht lediglich auf den Widerstandsmomenten des Instrumentes und giebt also das, was wir den anormalen Widerstand nannten.

Es sei W der Widerstand, welchen das Blut im Hämodromometer findet, wenn dieser Behufs einer Geschwindigkeitsmessung in die centrale und in die peripherische Mündung eines durchschnittenen Blutgefässes eingebracht ist; es sei ferner w derjenige Theil dieses Widerstandes, welcher durch die Glasröhre des Instrumentes veranlasst wird; so ist $W - w = W'$ der normale, d. h. der vom Gefässsystem allein bedingte Widerstand. Es bedarf also, um letzteren berechnen zu können, nur eines Nachweises der Werthe W und w.

Der Werth W wurde in allen jenen Versuchen gefunden, wo wir am Hämodromometer einen Druckmesser anbrachten, um das Verhältniss des Widerstandes zur Stromschnelle zu ermitteln (Cap. VIII).

So hatten wir:

1) bei einem Hunde $W = 2106$, $v = 280$
2) bei einem Schafe $W = 3240$, $v = 313$
3) bei einem Hunde $W = 1782$, $v = 250$
4) bei einem Pferde $W = 2087$, $v = 242$

in welchen Fällen der Widerstand auf die Druckhöhe einer Wassersäule reducirt ist.

Es ist einleuchtend, dass die Subtraction $W - w$ sich nur ausführen lasse, wenn beide Widerstandswerthe als Functionen einer und derselben Stromschnelle auftreten. Wir haben keine directen Beobachtungen, welche dieser Bedingung Genüge leisten, aber wir können auf indirectem Wege zum Ziele gelangen. Wir haben nämlich die zu unserem Hämodromometer gehörigen Widerstandscoëfficienten gefunden (§ 119), und da sich mit Hülfe dieser der zu einer beliebigen Stromschnelle gehörige Widerstand berechnen lässt, so können wir solche Werthe von w herstellen, welche mit W vergleichbar sind, und können, nach Ermittelung der Differenz $W - w = W'$, berechnen, um den wievielsten Theil der normale Widerstand durch den accessorischen des Instrumentes vermehrt ist.

In der dritten Beobachtungsreihe des § 122 wurde das Blut eines lebenden Hundes durch den Hämodromometer geleitet und angemerkt, wie sich das Verhältniss des Widerstandes zur Geschwindigkeit in einer Strecke von 900 Mill. Länge stellte. Reduciren wir den durch das Kymographion erhaltenen Quecksilberdruck auf Wasserdruck, so haben wir in der einen Beobachtung $w = 64 \cdot 13{,}5 = 864$ Mill. und $v = 849{,}8$ Mill., in der andern dagegen $w' = 42{,}6 \cdot 13{,}5 = 575{,}1$ und $v = 639{,}7$.*) Aus diesen Beobachtungen ergeben sich die bezüglichen Widerstandscoëfficienten durch Rechnung, und wir würden mit Hülfe dieser im Stande sein, den fraglichen Werth w für ein gegebenes v zu bestimmen, wenn nicht der Uebelstand einträte, dass ein solcher Werth von w sich nothwendig auf eine Strecke des Hämodromometers von 900 Millim. Länge bezöge, indem die Coëfficienten eben für eine solche Länge berechnet wurden. In den oben erwähnten Versuchen an 2 Hunden, einem Schafe und

*) Die vorgenommene Reduction des Quecksilberdrucks auf Wasserdruck ist unerlässlich, da, wie oben bemerkt, die Werthe von W sich auch auf den Druck einer Wassersäule beziehen.

einem Pferde war aber der Druckmesser auf der Mitte des Hämodromometers von 1,3 Meter Länge angebracht, und folglich war die Strecke desselben, von welcher der Widerstand w ausging, nicht 900, sondern 650 Mill. lang. Indess lässt sich diese Schwierigkeit in folgender Weise beseitigen. Nach § 6 verhalten sich die Widerstände unter übrigens gleichen Verhältnissen wie die Röhrenlängen. Es verhält sich also $900 : 650 = 864 : x$ für den ersten Fall, und $900 : 650 = 575{,}1 : y$ für den zweiten. Wir erhalten somit die Gleichungen

$$623{,}7 = \alpha\, 849{,}8^2 + \beta\, 849{,}8$$
$$\text{und } 552{,}1 = \alpha\, 639{,}7^2 + \beta\, 639{,}7.$$

Die Berechnung ergiebt $\alpha = 0{,}0004025$ und $\beta = 0{,}31990$ als diejenigen Coëfficienten, welche zu den von uns gesuchten Werthen von w gehören. Da nun $W' = W - w$, so ergiebt sich für den ersten Hund, dessen Blutgeschwindigkeit = 280 Millim. befunden wurde:

$$W' = 2106 - (\alpha\, 280^2 + \beta\, 280)$$
$$W' = 2106 - 141{,}3$$
$$W' = 1964{,}7 \text{ und } \frac{w}{W'} = \frac{1}{13{,}9}$$

oder in Worten: der durch Benutzung des Hämodromometers herbeigeführte accessorische Widerstand beträgt nur den vierzehnten Theil des normalen.

Mit Bezug auf die oben mitgetheilten 4 Beobachtungen erhalten wir nun folgende Werthe:

Thierart	v	W	w	W'	$\frac{w}{W'}$
Hund	280	2106	141,3	1964,7	$\frac{1}{13{,}9}$
Schaf	313	3240	162	3080	$\frac{1}{19}$
Hund	250	1782	123	1659	$\frac{1}{13{,}5}$
Pferd	242	2087	118,4	1968,6	$\frac{1}{17}$

Man sieht aus diesen Beispielen, dass der normale Wider-

stand durch Einführung des Hämodromometers in ziemlich geringem Masse vermehrt werde, und wird daher annehmen dürfen, dass die Geschwindigkeit der Blutbewegung durch den hemmenden Einfluss des Instrumentes nur eine unbedeutende Verminderung erfahre.

Cap. X.

Von der Dauer des Kreislaufs.

§ 126. Wir haben in einem früheren Abschnitte die Geschwindigkeit der Blutbewegung untersucht, d. h. die Frage, welchen Raum ein Blutmolekül in einer gegebenen Zeit zurücklege. Hierbei fand sich, dass die Geschwindigkeit, welche wir mit v bezeichneten, in verschiedenen Abschnitten des Gefässsystems die verschiedensten Werthe zeige.

Eine ganz andere Frage ist die, wie lange Zeit ein Blutmolekül brauche, um seinen Kreislauf durch den Körper zu vollenden. Eine geringe Ueberlegung lehrt, dass eine allgemeine Antwort hierauf nicht möglich sei. Die Gefässbahnen, durch welche ein Blutkörperchen circulirt, sind von der verschiedensten Ausdehnung, folglich ist nicht vorauszusetzen, dass die Dauer des Blutumlaufs in allen Körpertheilen dieselbe sein sollte. Man muss also entweder nachweisen, wie lange Zeit ein Blutmolekül zu seinem Umlaufe in einer bestimmten Gefässbahn brauche, oder man muss sich begnügen, den mittleren Werth der Umlaufszeit auszumitteln.

§ 127. Die mittlere Dauer der Circulation im Thierkörper kann nach folgendem Prinzip abgeschätzt werden. Es sei t die gesuchte mittlere Zeit des Umlaufs, x die Blutmenge des Thieres, y die Quantität Blut, welche mit einer Systole des linken Ven-

trikels entleert wird, und z die Dauer eines Pulses, so erhalten wir $t = z \cdot \frac{x}{y}$.

Setzen wir im erwachsenen Menschen die Blutmenge = 15 Kilogramm (= 30 ℳ.), ferner das Gewicht der durch eine Systole entleerten Blutmasse = 188 Gramm. (= 6,2 ʒ) und die Dauer eines Pulsschlages = 0,85″ (gegen 70 Pulse in 1 Minute), so erhalten wir

$$t = 0{,}85 \frac{15000}{188} = 67{,}5 \text{ Secunden.}$$

Natürlich ist diese Schätzung mehr nicht als eine ungefähre, da weder die Blutmenge noch die Capacität des Ventrikels mit hinreichender Sicherheit bestimmt sind.

Nach Valentins Versuchen soll die Blutmasse in den Säugethieren annäherungsweise $\frac{1}{5}$ vom Gewichte des Körpers betragen, und nach meinen oben mitgetheilten Untersuchungen beträgt die Blutmenge, welche mit einer Systole entleert wird, im Mittel etwa $\frac{1}{400}$ vom Körpergewichte. Bezeichnen wir nun das Gewicht des Körpers mit p, so ist $x = \frac{1}{5} p$ und $y = \frac{1}{400} p$,

$$\text{also } t = z \frac{80p}{p}$$

$$t = 80z$$

d. h. die Umlaufszeit des Blutes würde in den Säugern der Dauer der Pulsschläge direct oder, was dasselbe sagt, der Pulsfrequenz umgekehrt proportional sein. Da nun mit abnehmender Masse des Säugethierkörpers die Pulsfrequenz zunimmt, so würde die Dauer des Kreislaufs in den kleineren Geschöpfen eine geringere sein müssen, was von vorn herein wahrscheinlich ist; dagegen würde dieselbe nicht den Körperlängen und also auch nicht den Längen der Blutbahnen proportional sein, wie man anzunehmen geneigt sein konnte.

Lassen wir die vorstehende Betrachtung als approximativ brauchbar gelten, so würde sich die Dauer des Kreislaufs in verschiedenen Geschöpfen in folgender Weise verhalten.

Name des Geschöpfs	Pulszahl in 1 Minute	Dauer des Kreislaufs
neugeborenes Kind	140	34,29 Secunden
erwachsener Mensch	73	65,76 »
Pferd	40	120,0 »
Hund	120	39,99 »
Kaninchen	200	24,0 »
Eichhörnchen*)	500	9,59 »

§ 128. Hering hat sich bemüht, die Dauer des Kreislaufs durch Experimente zu ermitteln.**) Seine Methode besteht im Wesentlichen darin, eine unschädliche und leicht erkennbare Substanz in eine geöffnete Vene gegen das Herz hin einzuspritzen und zu untersuchen, wie viel Zeit dieselbe brauche, um auf der entgegengesetzten Seite der geöffneten Blutader oder auch in der gleichnamigen Vene der anderen Körperhälfte wieder zum Vorschein zu kommen.

Die brauchbarste Substanz zum Injiciren ist das blausaure Kali, indem es in mässigen Dosen, welche zum Gelingen des Versuches ausreichen, dem Thiere nichts schadet, andererseits aber im Blutserum durch Zusatz von schwefelsaurem Eisen blau niedergeschlagen und also sehr leicht erkannt wird. Hering verfuhr nun so, dass er beide Drosselvenen eines Pferdes freilegte und in die eine einen Trichter einband, welcher mit einem verschliessbaren Hahne versehen war. In diesen Trichter wurde die Auflösung gegossen und dann der Hahn geöffnet. Gleichzeitig wurde die andere Vene angestochen und das abfliessende Blut in numerirten Gefässen gesammelt. Jedes Mal nach Verlauf von 5 Secunden wurde das Gefäss gewechselt und das Blut in einem anderen Gläschen aufgefangen. Hiernach wurde die vollständige

*) Nach Young *Philos. transact.* 1809.

**) Tiedemann und Treviranus Zeitschrift für Physiologie III. S. 85 und V. S. 58.

Gerinnung des Blutes abgewartet und das Serum jedes Gläschens auf die Gegenwart des blausauren Kali geprüft.

In allen diesen Versuchen musste den anatomischen Anordnungen zu Folge die eingespritzte Substanz folgenden Weg nehmen. Sie strömte von der linken Drosselvene zum rechten Herzen, ging durch die Lunge in das linke Herz, von hier durch die Aorte und die Carotis in die obere Körperhälfte und durch die Capillaren dieser wieder in die Drosselvenen. Das Kali hatte demnach einen vollständigen Kreislauf, obschon in einer Blutbahn von beschränkter Länge zurückgelegt.

Nach den zahlreichen Beobachtungen Herings, welche von Poisseuille wiederholt und bestätigt worden sind,*) braucht das Blut zu einer Circulation in der eben beschriebenen Bahn nie eine volle Minute, gewöhnlich 25 — 30 Secunden. An kleineren Pferden und an einem Esel wurde bei beschleunigtem Pulse eine noch kürzere Dauer des Kreislaufs, in einem Falle nur von 10 — 15 Secunden, wahrgenommen.

§ 129. Die Beobachtungen Herings ergeben also eine noch grössere Geschwindigkeit des Blutumlaufs, als ich im vorhergehenden § berechnet hatte. Dies dürfte theilweise an einem Fehler seiner Methode liegen. Hering bestimmte die Dauer des Blutumlaufs, während eine Vene geöffnet war, also unter Umständen, wo die Stromschnelle einen Zuwachs erfahren hatte. Ich werde nämlich in einem späteren Abschnitte beweisen, dass jede Oeffnung einer Blutader, welche dem Blute einen freien Abfluss gestattet, die Widerstände vermindert, und dass diese Verminderung des Widerstandes der Stromschnelle zu Gute komme. Es bliebe nun zu untersuchen, ob, mit Bezug auf diesen Umstand, die Angaben Herings für wesentlich falsch zu erachten sind. Dies ist aus theoretischen und empirischen Gründen nicht anzunehmen.

Was erstere anlangt, so wird zwar durch Eröffnung der

*) *Annales des sciences nat.* 1843.

Drosselvene der Widerstand vermindert werden, aber diese Verminderung wird nothwendig äusserst geringfügig sein müssen. Schneiden wir die Drosselvene durch und gestatten dem Blute freien Abfluss, so werden für dieses alle diejenigen Widerstandsmomente beseitigt, die es auf dem Wege von der Drosselvene bis zum rechten Herzen noch zu überwinden hätte. Diese Widerstandsmomente bilden aber von der Summe aller Widerstände, welche dem strömenden Blute entgegentreten, nur einen verschwindend kleinen Theil, und folglich kann auch die Begünstigung, welche die Stromschnelle durch das Oeffnen der Vene erhält, nur äusserst unbedeutend sein.

Aber auch directe Erfahrungen bestätigen, dass Hering sich nicht in bedeutendem Masse geirrt haben könne. Wir besitzen nämlich Beobachtungen über die Zeit, in welcher Substanzen aufgesogen und mit dem Blutstrome den Secretionsorganen zugeführt werden; solche Beobachtungen lassen keinen Zweifel übrig, dass die Dauer eines Kreislaufs eine überaus kurze sei. Westrumb nahm Morgens nüchtern 2 Loth der wässrigen Rhabarbertinctur, liess 5 Minuten hierauf den nächtlichen Harn und erkannte in diesem bereits die Gegenwart des Rhabarbers bei Zusatz von Aetzkali. Derselbe durchschnitt bei Thieren die Ureteren, band in dieselbe silberne Röhrchen ein und fing den Harn auf, nachdem er gewisse leicht erkenntliche Substanzen in den Magen injicirt hatte. Rhabarber wurde bei einem Kaninchen nach 5 Minuten, blausaures Kali bei einem Dachshunde nach 2 Minuten im Harn wahrgenommen.*) In diesem Zeitraume musste nicht nur eine Resorption und Excretion der angegebenen Stoffe zu Stande kommen, sondern es mussten auch die im Magen resorbirten Substanzen durch die Pfortader und Lebervene zum rechten Herzen, von hier durch die Lunge, durch das linke Herz und durch das Arteriensystem zur Niere gelangen. Bedenkt man, dass von den 2 Minuten, welche das blausaure Kali brauchte,

*) Meckels deutsches Archiv für Physiologie VII. 538 u. f.

um sich im Harn wahrnehmbar zu machen, noch die Zeit der Resorption und Excretion in Abzug gebracht werden müssen, wenn man die Dauer der Circulation berechnen will, und erwägt man ferner, dass die ersten Moleküle Kali, welche mit dem Blutstrome zur Niere gelangten, unstreitig nicht ausreichten, um diesen für das Reagens empfindlich zu machen, so wird man unbedenklich annehmen dürfen, dass auch in diesem Falle der Blutumlauf in weniger als einer Minute zu Stande gekommen sei.

Allen Thomson hat den Versuchen Herings das unbegründete Bedenken entgegengesetzt, dass das blausaure Kali, welches im aufgelösten Zustande in eine Vene gespritzt wurde, eine grosse Neigung habe, alle Gewebe des Körpers schnell zu durchdringen.*) Zwar ist richtig, dass jene Substanz zu denen gehört, welche dünne thierische Membranen schnell durchdringen, demohngeachtet ist nicht im Entferntesten daran zu denken, dass das Auftreten des *Kali borussicum* in der linken Drosselvene, wenn es 20 bis 30 Secunden vorher in die gleichnamige Ader der rechten Seite gespritzt worden war, auf Exosmose bezogen werden könne. Dies ergiebt sich schon aus Herings Versuchen. Wenn derselbe einem Thiere das Rückenmark durchschnitt, so erschien das rechter Seits in die Venen eingespritzte Kali in den Venen der linken Seite sehr viel später, als unter dem normalen Verhältnisse. Man kann nicht annehmen, dass hier die Operation die Neigung des Mittels, die Gewebe zu durchdringen, verändert, vielmehr ist anzunehmen, dass dieselbe durch eine gewaltige Erschütterung der Lebenskräfte und, wenn man hiervon abstrahiren wollte, jedenfalls durch den Blutverlust die Kraft der Circulation gebrochen habe. Noch entscheidender in dieser Beziehung ist ein Versuch von Westrumb. Einem Hunde wurde eine halbe Drachme blausaures Kali in den Magen gespritzt. Nach 2 Minuten zeigten sich Spuren desselben im Harn, nach 10 Minuten war die Reaction sehr heftig, und als der Hund getödtet

*) *Todd, Cyclopaedia of anatomy and physiology* I. pag. 660.

wurde, war in der Lymphe und im Chylus vom Kali nichts wahrzunehmen.*) Hätte das Mittel, wie Thomson annimmt, die Fähigkeit, alle Gewebe zu durchdringen, so hätte es durch die zarten Wandungen der Lymphgefässe ebenfalls hindurchsetzen müssen. Mit Recht schliesst Westrumb, dass in dem von ihm angestellten Versuche das Kali nicht durch die Lymphgefässe, sondern durch die Blutgefässe aufgesogen worden sei, und wir werden weiter schliessen, dass es in der kurzen Zeit von 2 Minuten weder auf geheimen Harnwegen, noch mittels Durchdringung aller Gewebe, sondern durch die Blutgefässe zur Niere gelangt sei.

Weitere Beweise für die ausserordentliche Schnelligkeit der Circulation finden sich in Tiedemanns wichtigen Untersuchungen über die Lungenausdünstung.**) Stinkender Asant, welcher mit einem Klystire einer Katze beigebracht worden war, wurde nach 4 Minuten, und Alkohol, in das Bauchfell eines Hundes eingespritzt, nach 3 Minuten durch den Geruch des Athems verrathen. Tiedemann spritzte riechende Substanzen bei Hunden in eine Schenkelvene und fand, dass Knoblauchsaft in 3 Secunden, Kampher nach 16 Secunden, Bisam, Weingeist, Terpentinöl und Schwefelkohlenstoff fast unmittelbar nach Vollendung der Injection (deren Dauer freilich nicht angegeben ist) durch das Geruchsorgan im Athem wahrgenommen wurden. Als 2 Drachmen Oel, in welchen 5 Gran Phosphor gelöst waren, in die Schenkelvene eingespritzt wurden, stiess das Thier gleich nach beendigter Injection einen weissen, nach Phosphor riechenden Athem aus. Diese Versuche widerlegen den von Thomson erhobenen Einwurf, dass der schnelle Uebergang des blausauren Kalis aus einem Körpertheile in einen anderen auf einer spezifischen Eigenthümlichkeit dieses Mittels, nämlich auf seiner Neigung beruhe, durch thierische Gewebe hindurchzudringen. Tiedemann sah, wie eben ausgeführt wurde, ähnliche rasche

*) A. a. O. 540.

**) Zeitschrift für Physiologie V. 203.

Uebergänge bei Injection der verschiedenartigsten Substanzen und unterliess nicht hieraus zu folgern, dass dieselben mit dem Venenblute sehr rasch zu den Lungen gelangen müssten. Mag immerhin zugegeben werden müssen, dass der Weg von der Schenkelvene bis zur Lunge nur den kleineren Theil einer vollständigen Kreisbahn ausmache, so bleibt doch bei der überraschend kurzen Zeit, in welcher dieser Abschnitt der Blutbahn zurückgelegt wurde, kein Zweifel übrig, dass auch die vollständige Circulation nur sehr wenig Zeit, nämlich für Hunde kaum $\frac{1}{2}$ Minute, in Anspruch nehme.

Nach dem Mitgetheilten stehe ich nicht an, die Heringschen Versuche für ziemlich zuverlässig zu halten. Vergrössert man die von Hering erhaltenen Zeitwerthe ein wenig, weil die Aderlässe, mit welchen er operirte, allerdings den Blutlauf etwas beschleunigen mussten, so kommt man auf Zahlen, die denen sehr nahe stehen, welche ich auf dem Wege etwas zusammengesetzter Rechnungen (§ 127) gefunden hatte.

§ 130. Man kann die Dauer eines Kreislaufs noch auf eine andere Weise schätzen, und auch diese führt auf geringe Zahlenwerthe. Bei einem Pferde von mittlerer Grösse beträgt die Entfernung vom Herzen bis zum *tarsus* gegen 2,5 Meter. Nun war nach meinen Messungen die Geschwindigkeit der Blutbewegung in der Aorte im Mittel 400 Millimeter, die in der *arteria metatarsi* 56 Mill. Die mittlere Geschwindigkeit des Blutstroms vom Herzen bis zum Hinterhufe kann also auf 228 Millimeter geschätzt werden, und mit dieser Geschwindigkeit braucht das Blut, um den angegebenen Werth zurückzulegen, 11 Secunden. Ferner ist nach meinen Beobachtungen die Geschwindigkeit der venösen Ströme nicht auffallend geringer als die der arteriellen, aber setzen wir auch, sie sei doppelt langsamer, so braucht das Blut zum Rückflusse doch nur 22 Secunden. Addiren wir beide Zahlen zusammen, so erhalten wir 33″ als die Zeit, welche das Blut braucht, um bei einem Pferde durch die Arterien und Venen der grössten Blutbahn des grossen Kreislaufs zu dringen. Die Bahn

des kleinen Kreislaufs ist nicht nur überaus viel kürzer, sondern auch die Blutbewegung in den Lungencapillaren, nach Versuchen an kaltblütigen Thieren zu schliessen, sehr viel schneller als in den Haargefässen anderer Körpertheile. Wir rechnen, glaub' ich, recht reichlich, wenn wir die Dauer des kleinen Kreislaufs zu $\frac{1}{5}$ des grossen anschlagen. Demnach hätte man $33 + \frac{33}{5} = 39{,}6$ Secunden für die Dauer eines Kreislaufs durch die Arterien und Venen der grössten Blutbahn, die Haargefässe nicht mitgerechnet. Nun fliesst freilich das Blut in den Haargefässen überaus viel langsamer als in den Arterien und Venen, andererseits ist aber auch die Strecke der Capillaren überaus viel kürzer als die der übrigen Gefässe. Rechnet man nun die Dauer eines Kreislaufs im Pferde 1 Minute, so kann das Blut im Capillarnetze fast ebenso lange weilen, als in allen anderen Körpertheilen zusammen genommen, und rechnet man die Dauer, wie oben geschehn, 2 Minuten, so kommt auf die Circulation in der äusserst kurzen Strecke der Capillaren nahezu drei Mal so viel Zeit, als auf die Circulation durch die ausgedehntesten Bahnen des grossen Körpers.

Die eben angestellten Betrachtungen bezwecken mehr nicht als nachzuweisen, dass die Resultate der Heringschen Versuche nicht so unglaublich sind, als sie von einigen Seiten her geschildert wurden. Wenn man bis vor Kurzem die mittlere Dauer des Kreislaufs im Menschen auf 3 bis 4 Minuten schätzte, so lag dies daran, dass man die Capacität des Herzens für zu gering erachtete. Man berechnete nämlich, wie auch oben geschehn (§ 127), die mittlere Dauer der Circulation nach der Zahl der Herzschläge, welche nöthig wären, um die gesammte Blutmasse zu entleeren, und kam natürlich auf viele Pulsschläge oder, was dasselbe ist, auf eine lange Zeit, indem man glaubte, dass das Herz mit jeder Systole nur 2 Unzen oder, wie Einige meinten, gar nur 1 Unze entleerte. Das Irrige dieser Annahme ist oben schon erörtert worden.

§ 131. Bei der verschiedenen Länge der Bahnen, durch welche das Blut kreist, ist wahrscheinlich, dass die Circulation in verschiedenen Organen des Körpers eine verschiedene Zeit beanspruche. Joh. Müller äussert sich in dieser Beziehung auf folgende Weise: Die Zeit, in welcher das Blut den Weg von der einen zur anderen Herzhälfte oder die Hälfte des Kreislaufs zurücklegt, ist für verschiedene Organe sehr verschieden. Das Blut, das von dem linken Herzen durch die *vena coronaria cordis* zum rechten Herzen gelangt, braucht einen ausserordentlich viel kürzeren Zeitraum zu dieser Bahn als das Blut, welches vom linken Herzen dem Fusse zuströmt und zum rechten Herzen zurückkehrt, und so bildet die Circulation vom linken Herzen zum rechten unendlich viele, verschieden grosse Bogen, wovon der kleinste der durch die Kranzgefässe oder die ernährenden Gefässe des Herzens selbst ist, u. s. w.*)

Diese Lehrsätze beruhen auf Voraussetzungen, welche, vielleicht mehr als zulässig ist, von den particulären Einrichtungen des Gefässsystems abstrahiren. Wir können uns die Dauer eines Kreislaufs als die Summe zweier Zeitmomente $x + y$ vorstellen, wo x die Zeit bedeutet, welche das Blut braucht, um durch die Adern oder grösseren Blutkanäle zu strömen, y aber die Zeit, wo es durch die Capillaren hindurchsetzt. Nach dieser Bestimmung ist x eine von der Länge der Blutbahnen abhängige Grösse, y dagegen nicht. Nun wird Alles auf das Verhältniss von $x : y$ ankommen. Je grösser y im Verhältniss zu x ist, um so einflussloser wird die Länge der Blutbahnen auf die Dauer des Kreislaufs. Man kann sich aber denken, dass x und y sich im entgegengesetzten Sinne verändern. Es kann x mit Verlängerung der Blutbahnen wachsen und y mit Verschmälerung der Gefässhöhle in den Capillaren fallen. Unter solchen Umständen würde ein verzögerndes und ein beschleunigendes Moment sich entgegenarbeiten, und die Verzögerung des Kreislaufs durch die Länge der bezüglichen Blutbahn könnte in Wegfall kommen.

*) Joh. Müller, Handbuch der Physiologie des Menschen, 4. Aufl. I. 154.

Ich bin geneigt zu glauben, dass die Dauer des Blutumlaufs in Bahnen von verschiedener Grösse nicht auffallend verschieden, am wenigsten aber der Länge der Bahnen proportional sei. Zu dieser Ansicht bestimmen mich zwei Gründe.

Erstens dürfen wir annehmen, dass die Zeit, welche das Blut braucht, um durch die Capillaren zu dringen, im Verhältniss zu der Zeit, welche es zum Durchströmen der Adern bedarf, eine ziemlich bedeutende ist. Zu dieser Annahme berechtigt uns die ausserordentliche Geschwindigkeit, mit welcher das Blut bis in die nächste Nähe der Capillaren gelangt, und die auffallende Langsamkeit der Blutbewegung in diesen selbst.

Nach dem, was im vorigen § über die Dauer eines Kreislaufs im Pferde, und zwar durch die längste aller Blutbahnen, vom Herzen bis zum Hinterfusse und rückwärts, gesagt wurde, wird es kaum auffallen können, wenn wir annehmen, das Blut bedürfe nicht weniger Zeit, um durch die Capillaren zu gelangen, als um den Weg durch sämmtliche grössere Adern zurückzulegen. Nennen wir die Zeit t, so erhalten wir die Gleichung

$$t = x + y = 2x.$$

Würde nun gefragt, wie lange das Blut brauche, um durch eine vier Mal kürzere Blutbahn zu circuliren, so könnte man mit Hülfe solcher Voraussetzungen, wie sie den Angaben Müllers zu Grunde zu liegen scheinen, annehmen, der Werth x sei um das Vierfache verkleinert, während y unverändert bliebe, und wir hätten dann

$$t = \tfrac{1}{4}x + y = \tfrac{5}{4}x.$$

Unter diesen Annahmen verhielte sich die Dauer eines Kreislaufs in der vier Mal kürzeren Bahn zu der in der vier Mal längeren nicht wie 1 : 4, sondern wie 5 : 8.

Zweitens aber sind die kurzen Blutbahnen auch die engeren, und da mit Abnahme des Durchmessers der Röhren die Widerstände wachsen, so muss die kleinere Blutbahn, eben vermöge ihrer Enge, ein verzögerndes Moment enthalten, welches in der längeren, aber weiteren Blutbahn nicht vorhanden ist. Aus diesem

Grunde ist nicht zulässig zu sagen, dass mit viermaliger Verkürzung der Blutbahn der Werth x auf $\frac{1}{4}\,x$ herabsinke, und die Gleichung

$$t = \tfrac{1}{4}\,x + y = \tfrac{5}{4}\,x$$

ist falsch, weil x oder die Zeit, welche das Blut zum Durchströmen der nicht capillären Partie des Blutgefässsystems braucht, in der vier Mal kürzeren Blutbahn um weniger als $\frac{3}{4}$ abgenommen hat. Offenbar wird dann t grösser als $\frac{5}{4}\,x$ und kommt der Dauer des Kreislaufs in der vier Mal grösseren Bahn, $= 2\,x$, noch näher.

Hiermit ist erwiesen, dass die Dauer des Kreislaufs sich nicht umgekehrt wie die Länge der Blutbahnen verhalte, sondern in kürzeren Bahnen verhältnissmässig mehr Zeit beanspruche als in langen. Man könnte sich vorstellen, dass dieser Umstand für die Erhaltung einer gleichmässigen Blutmischung vortheilhaft sei. Wenn nämlich Blutbahnen vorkommen, welche sich bezüglich der Länge um das Zehnfache unterscheiden, so würde es allerdings auffallend sein, dass gewisse Blutkügelchen von der Wechselwirkung mit der Luft zehn Mal länger abgehalten sein sollten als andere.

§ 132. Hering hat nachgewiesen, dass die Schnelligkeit der Circulation zu der Beschleunigung des Pulses in keinem bestimmten Verhältnisse stehe. In einer sehr ausgedehnten Versuchsreihe wurde die Dauer der Circulation bei normalem und bei künstlich beschleunigtem Pulse verglichen, wobei sich herausstellte, dass ein um das Doppelte, ja selbst das Dreifache beschleunigter Puls auf die Verkürzung des Kreislaufs oft gar keinen Einfluss hatte.

Diese Resultate stimmen vollkommen mit denen, welche ich gewonnen und in dem Abschnitte über die Geschwindigkeit der Blutbewegung mitgetheilt habe. Ich zeigte dort namentlich, dass abnorme Frequenz des Pulses, wie sie in meinen Versuchen durch Aderlässe oder Durchschneidung der *n. vagi*, in Herings Versuchen dagegen durch dem Thiere beigebrachte Medicamente erzielt wurde, sehr gewöhnlich mit einer Abnahme des Werthes

v und folglich auch mit Verlangsamung der Circulation verbunden sei.

Es könnte nun scheinen, dass ich hier in einen gewissen Widerspruch mit mir selbst geriethe, indem ich § 127 zur Berechnung der Dauer des Kreislaufs in verschiedenen Thieren eine Formel aufstellte, nach welcher diese Dauer zu dem Zeitmasse eines Pulsschlages und folglich auch zu der Frequenz des Pulses in einem gesetzlichen Verhältnisse stehen müsste. Gleichwohl wird sich bei genauerer Untersuchung finden, dass ein Widerspruch hier nicht vorliegt.

Ich habe zunächst zu bemerken, dass die Formel $t = 80\ z$, wo t die Dauer der Circulation und z das Zeitmass eines Pulses bezeichnet, eine durchaus empirische Formel ist, von welcher zwar keine sonderliche Präcision zu hoffen, aber noch weniger ein directer Widerspruch mit der Erfahrung zu fürchten steht.

Die vorhandene Schwierigkeit ist also im Grunde die: wie war es möglich, auf empirischem Wege zu einer Formel zu gelangen, welche für die Reihe der Säugethiere ein directes Verhältniss zwischen der Pulsfrequenz und der Schnelligkeit des Kreislaufs behauptet, wenn die an einzelnen Thieren gewonnenen Erfahrungen ein solches Verhältniss nicht kundgeben?

Diese Schwierigkeit fällt weg, wenn man bedenkt, dass die von mir aufgestellte Formel $t = 80\ z$ nur eine ungefähre Geltung beansprucht. Je weniger sich dieselbe anmasst, die Beziehung zwischen Pulsfrequenz und Dauer des Kreislaufs exact auszudrücken, um so eher konnte sie aus Erfahrungen abgeleitet werden, welche eine vollständige Uebereinstimmung vermissen lassen. Ich fand, dass bei Säugern mit jedem Herzschlage eine Blutmenge entleert wird, welche nahezu $\frac{1}{400}$ der Körpermasse beträgt; natürlich wächst dann die Schnelligkeit des Blutumlaufs mit der Häufigkeit der Pulse. Operirt man an einzelnen Thieren, so trifft dies nicht immer ein, d. h. man stösst auf Schwankungen in den Verhältnissen, die indess nicht weiter gehen können, als das Gesetz, auf welches die Formel Bezug nimmt, sie zulässt.

§ 133. Die mannigfachen Modificationen der Lebensverrichtungen, welche im Gefolge einer veränderten Blutmischung eintreten, veranlassten Poisseuille zu untersuchen, ob nicht, ganz abgesehn von den sogenannten Lebenskräften, eine physikalische Ursache aufzufinden sei, deren gleichartiger Einfluss auf organische wie auf unorganische Körper den Wechsel der Erscheinungen verständlich mache. Er stellte sich zunächst die Frage: kann eine veränderte Mischung des Blutes, ganz abstrahirt von dem Einflusse, welchen sie auf den Organismus als ein Lebendiges hat, Veranlassung zu einer verschiedenen Geschwindigkeit der Circulation geben?

Ich glaube, dass man diese Frage, noch ehe Versuche angestellt werden, getrost bejahen kann. Wir dürfen annehmen, dass Veränderungen der Mischung einen Einfluss auf den Flüssigkeitsgrad des Blutes haben, und müssen annehmen, dass ein schwer flüssiges Blut unter sonst gleichen Verhältnissen langsamer fliesse als ein leicht flüssiges.

Wenn nun Poisseuille sich bei dieser Schlussfolge nicht beruhigte, sondern Experimente anstellte, so ist vorauszusetzen, dass es ihm weniger auf eine allgemeine Beantwortung seiner Frage als auf eine specielle ankam, und dass er für bestimmte Stoffe ermitteln wollte, nach welcher Richtung hin und in welchem Grade sie die Geschwindigkeit der Blutbewegung zu verändern vermöchten.

Der französische Physiker stellte demnach 3 Reihen von Versuchen an: die erste mit Haarröhrchen aus Glas, die zweite an Capillaren getödteter Thiere und die dritte an den Capillaren lebendiger Individuen.*) In der ersten Versuchsreihe wurde die Zeit verglichen, welche gleiche Volumina verschiedener Flüssigkeiten brauchten, um bei gleichem Drucke und unter sonst gleichen Verhältnissen durch eine gegebene Haarröhre hindurchzudringen. Verglichen wurde destillirtes Wasser mit verschiedenen Salzlösungen, mit Alkohol und mit Serum.

*) *Annales des sciences nat.* 1843. pag. 20.

Es fand sich, dass Alkohol die Geschwindigkeit der Strömung beeinträchtige, während ein Zusatz von Salpeter dieselbe begünstigt. Der Ausfluss des Serums erforderte annäherungsweise die doppelte Zeit, welche das destillirte Wasser brauchte. Wurde das Serum mit Alkohol versetzt, so floss es noch langsamer ab; wurde ihm dagegen eins der Salze zugemischt, welche das Fliessen des Wassers begünstigen, so erfolgte auch dies Mal der Abfluss schneller.

Vollkommen entsprechende Resultate erhielt Poisseuille in der zweiten Versuchsreihe, welche so eingerichtet war, dass die in Vergleich zu bringenden Fluida in eine Schenkelarterie einströmten und durch die Schenkelvene wieder abflossen. Jede Substanz wirkte begünstigend oder hemmend auf die Bewegung, wie sie gleicher Weise in den Glasröhren gewirkt hatte.

Die dritte Beobachtungsreihe an lebenden Pferden wurde so angestellt, dass an dem einen Tage, nach der Heringschen Methode, blausaures Kali in die Drosselvene gespritzt und die Umlaufszeit des Blutes bestimmt wurde, während am nächstfolgenden Tage nicht blos blausaures Kali, sondern mit ihm gleichzeitig Alkohol oder eine Salzlösung injicirt wurde, deren Einfluss auf die Dauer der Circulation nun eben in Frage gestellt werden sollte.

Auch bei dieser dritten Versuchsreihe bewährte es sich, dass Alkohol die Blutströmung verlangsamte, dagegen eine Lösung von Salpeter oder essigsaurem Ammoniak sie beschleunigte, woraus denn schliesslich gefolgert wird, dass die zu den Versuchen verwendeten Substanzen, in Folge physikalischer Gründe, die Geschwindigkeit des Fliessens in einer Weise modificirten, welche in Glasröhren, in todten und in lebendigen Blutgefässen von gleicher Natur sei. Diese Folgerung hat nur die Wahrscheinlichkeit für sich, ohne durch die Experimente mit Strenge erwiesen zu werden. Es sind nämlich die Geschwindigkeitsdifferenzen, welche Poisseuille in seinen Versuchen wahrnahm, in allen von ihm mitgetheilten Fällen so gering, dass sie innerhalb der nor-

malen Schwankungen der Stromschnelle fallen und also nicht nothwendig als Folgen der von ihm künstlich veränderten physikalischen Bedingungen betrachtet werden müssen. *)

Der auffallendste Unterschied in der Schnelligkeit des Blutumlaufs war 25 — 30″ unter normalen Umständen und 40—45″ nach Einspritzung von Alkohol. Ebenso grosse Verschiedenheiten der Geschwindigkeit kommen bei Thieren auch ohne äussere Veranlassung oft in kürzeren Zwischenräumen als 24 Stunden vor (§ 113).

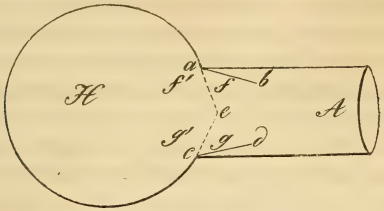
Cap. XI.

Erörterung einiger anatomisch-physiologischer Verhältnisse im Gefässsysteme.

§ 134. Alle gründlichen Anatomen und Physiologen erkennen an, dass die Herzklappen den Rückfluss des Blutes hindern, und es dürfte überflüssig sein, auf die Einwürfe einzugehen, welche von einem Verehrer der Naturphilosophie noch vor wenigen Jahren gegen diese Annahme erhoben wurden. Minder einig ist man darüber, ob die Klappen den Rücktritt des Blutes absolut verhindern oder nur theilweise. Mir scheint aus mechanischen Gründen die letzte Annahme die einzig zulässige. Die Klappen schliessen sich nicht von selbst, sondern werden geschlossen durch das rückfliessende Blut. Natürlich erfordert dieser Schluss Zeit, und während dieser Zeit ist einem Theile des zurückströmenden Blutes Gelegenheit gegeben, in die Abtheilung des Herzens wieder einzudringen, aus welcher es so eben durch die Gewalt der Systole entfernt wurde.

*) Man vergleiche die Fälle a. a. O. 32.

Um dies noch anschaulicher zu machen, benutzen wir folgende Figur.



Es bedeute *H* die Herzkammer, *A* die Aorte, endlich *a b* und *c d* die Klappen, und zwar während des Zeitraums der Systole oder im Momente ihres Offenstehens. Sobald nun die Kammer sich vollständig entleert hat, erschlafft sie, die Aorte dagegen befindet sich im Zustande der höchsten Spannung und zieht sich zusammen. In dem Zeitmomente, wo die Contraction der Aorte beginnt, ist die Mündung derselben zwischen *a* und *c* noch offen, und der Raum zwischen den Klappen ist bei *f* und *g* mit Blut erfüllt. Der Druck der gespannten Aortenwände verschiebt das Blut, und dieses entweicht theils nach der Seite der Haargefässe, theils nach der Seite des Herzens. Der Rückfluss nach der Seite des Herzens vermittelt den Schluss der Klappen. So lange nun diese zwischen *b d* noch offen stehen und noch nicht die Stellung angenommen haben, welche durch die punktirten Linien *a e* und *c e* angedeutet ist, muss nothwendig das Blut in die erschlaffte Kammer einströmen können, und namentlich ist einleuchtend, dass die Blutmasse, welche bei dieser rückgängigen Bewegung vor den Klappen liegt, nämlich die Masse bei *f* nach *f'* und die Masse bei *g* nach *g'* in das Herz zurückgedrängt, nämlich durch die Klappen selbst hineingeschoben werden müsse.

Mit dieser Ansicht lassen sich die Resultate der Injectionen recht wohl vereinigen. Spritzt man gefärbte Massen in die Arterien, so findet man nicht selten auch die linke Herzkammer zum Theil erfüllt. Häufiger freilich ist sie vollkommen leer, wie

sehr begreiflich. In den meisten Fällen sind nämlich die Arterien nach dem Tode nicht absolut leer, sondern enthalten noch etwas Blut. Die Injectionsmasse schiebt nun dieses Blut vor sich her, drängt einen Theil davon ins Herz und verschliesst die Klappen mit Hülfe desselben. Unter diesen Umständen werden die Klappen geschlossen, noch ehe die Injectionsmasse am Herzen ankommt.

Dass die Klappen den Rückfluss des Blutes nicht absolut verhindern, beweist ein von Poisseuille angestellter Versuch auf das Schlagendste.*) Um den Einfluss der Respiration auf die Blutbewegung in den Venen zu prüfen, wurde der Hämodynamometer in das centrale Ende der durchschnittenen Drosselvene eingebunden. Nun ergab sich, dass mit jeder Einathmung eine Aspiration der im Instrumente befindlichen Natronlösung eintrat. Letzteres fiel also bei jeder Inspiration unter den Nullpunkt des Instrumentes und stieg bei jeder Exspiration über denselben. In einem Falle ergaben sich aber lauter negative Werthe, nur bei der Inspiration grössere, z. B. während der Inspiration — 70, während der Exspiration — 5, statt des erwarteten + 70. Die anatomische Untersuchung ergab, dass sich in der Vene, zwischen dem Herzen und der Mündung des Hämodynamometers, eine Klappe befand. Offenbar hinderte diese den Rückfluss des Blutes und das hiervon abhängige Steigen der Natronlösung, aber sie hinderte es nicht vollständig, denn es hob sich die Lösung von — 70 bis — 5, also um 65 Millimeter.

§ 135. Die Venenklappen haben nicht die Bestimmung, die durch die Schwerkraft verlangte Rückwärtsbewegung des Blutes unmöglich zu machen, eine Meinung, welche durch Hallers Autorität eine weite Verbreitung fand. Bei dem aufrechten Gange des Menschen haben allerdings sehr viele Venen eine derartige Lage, dass das Blut in ihnen der Schwere entgegenfliesst; bei den Säugern dagegen, welche auf 4 Füssen schreiten, ist dies

*) *Magendie, Journal de physiologie,* 1830. p. 285.

schon weniger der Fall, und bei den Cetaceen, den langgestreckten Amphibien und Fischen haben fast alle Venen eine horizontale Richtung. Schon dieser Umstand hätte andeuten sollen, dass sich die Einrichtung der Venenklappen nicht darauf beziehe, die Schwerkraft des Blutes unschädlich zu machen, aber eine nahe liegende physikalische Betrachtung beweist dies noch schlagender. Das Blut in den Venen kann seinem natürlichen Laufe nur folgen, wenn die Klappen offen stehen, und umgekehrt können diese den Rücktritt des Blutes nur hindern, wenn sie geschlossen sind. Hieraus ergiebt sich, dass, während das Blut circulirt, von einer Wirkung der Venenklappen gegen die Schwere nicht die Rede sein könne.

Die Venenklappen wirken unter normalen Verhältnissen des Kreislaufs gar nicht, sondern haben ausschliesslich den Zweck, eine rückgängige Bewegung des Blutes, bei Gelegenheit von äusserem Drucke auf die Adern, unmöglich zu machen. Eine solche Bewegung würde ohne die Gegenwart der Klappen sehr leicht eintreten, einerseits wegen der Dünnhäutigkeit der Gefässe und der Geringfügigkeit des Blutdrucks in ihnen, andererseits wegen der Lage der Venen, welche in der Mehrzahl der Fälle eine mehr äusserliche ist. In Uebereinstimmung mit dieser Erklärung ist die Thatsache, dass Venen, welche vor äusserem Drucke geschützt sind, wie beispielsweise die Venen der Knochen, mit Klappen nicht versehen sind.

§ 136. Anastomosen sind Verbindungskanäle zwischen verschiedenen Blutströmen. Hieraus ergiebt sich ihre physiologische Bestimmung ohne Schwierigkeit. Zunächst vermindern die Anastomosen den Uebelstand, dass in Folge zufälliger Verschliessung von Blutgefässen zu grosse Blutmassen ausser Bewegung gesetzt werden. Man denke sich, eine unverzweigte Arterie werde unterbunden, so ist einleuchtend, dass ihr Inhalt von der Unterbindungsstelle bis zum Ursprunge des Gefässes in Stillstand gerathe. Befindet sich dagegen zwischen der Unterbindung und der Ursprungsstelle ein anastomotischer Seitenast,

so stockt nur die Blutmasse, welche sich zwischen ihm und der Ligatur befindet. Aus diesem Gesichtspunkte wird begreiflich, warum die Zahl der Anastomosen mit Verkleinerung der Gefässe zunimmt und in den Venen grösser ist als in den Arterien; nämlich Anastomosen mussten in den Theilen des Gefässsystems vorzugsweise angelegt werden, wo die Blutkanäle theils durch die Zartheit ihrer Wandungen, theils durch ihre mehr äusserliche Lage der Gefahr mehr ausgesetzt sind, durch äusseren Druck verschlossen zu werden.

Eine zweite Folge der Anastomosen, jedoch nur derer zwischen zuführenden Gefässen, ist die, dass gewissen Theilen der Zufluss arteriellen Blutes und hiermit ihre unausgesetzte Ernährung besser gesichert wird. Die Verbindung zwischen den Wirbel- und Kopfschlagadern, desgleichen die Anastomosen zwischen den oberen und unteren Gelenkarterien am Ellenbogen und Knie geben bekannte und einleuchtende Beispiele.

Die Anastomosen begünstigen drittens die localen Schwankungen in der Blutmenge, welche nicht nur unter pathologischen Verhältnissen als Hyperhämie und Anämie, sondern auch im gesunden Leben vielfältig vorkommen, so das Erröthen und Erbleichen, den Turgor der Genitalien u. s. w. Da das Blutgefässsystem ein geschlossenes Ganzes ausmacht, so kann Vermehrung der Blutmenge an einem bestimmten Punkte nur durch Verminderung derselben an einem oder mehreren anderen entstehen. Die Anbringung von Anastomosen erzeugt die Möglichkeit, dasse in Theil auf Kosten eines anderen, sehr nahe liegenden turgescire, woraus weiter folgt, dass, je näher sich die Anastomosen zusammendrängen, um so eher sehr plötzliche und räumlich sehr beschränkte Hyperhämien auftreten können, zwei Verhältnisse, welche aus alltäglichen Erfahrungen hinreichend bekannt sind.

Wenn in den angegebenen Beziehungen die physikalischen Folgen der Anastomosen klar genug vorliegen, so lässt sich andererseits nicht leugnen, dass in vielen Fällen nicht übersichtlich ist,

aus welchen Gründen der Organismus die Erreichbarkeit solcher Folgen sichern musste. Wir sind berechtigt anzunehmen, dass constante Anastomosen, besonders in grösseren Gefässen, zur Erreichung eines bestimmten Zweckes dienen, aber dieser Zweck bleibt in vielen Fällen zweifelhaft, in manchen ist er nicht einmal angedeutet.

Die bei den Vögeln constante Anastomose, zwischen der Pfortader und der unteren Hohlvene, welche durch zwei auffallend weite, durch die Nieren hindurchsetzende Blutkanäle hergestellt wird, ist ihrem Zwecke nach durchaus dunkel. Gleichwohl sind die physikalischen Folgen dieser Einrichtung bis zu einem gewissen Punkte wenigstens nicht zweifelhaft. Es ist nämlich für das Blut der hinteren Körperhälfte ein doppelter Weg gegeben; der eine führt durch die Pfortader und ihre Verzweigungen, der andere durch den einfachen und weiten Kanal der Hohlvene. Da letzterer Weg der bequemere ist, so muss der grössere Theil der Blutmasse eben diesen einschlagen. Die Anastomose in der Niere dient als Abzugskanal des Blutes aus der Pfortader in die Hohlader und bewirkt, dass weniger Blut durch das Pfortadersystem dringt und folglich in diesem langsamer fliesst, als bei Abwesenheit einer solchen Kanalverbindung hindurchgeflossen sein würde. So unantastbar diese Folgerung ist, so wenig trägt sie bei, die Absichten der Natur verständlich zu machen. Von der einen Seite konnte es scheinen, und viele Physiologen haben das Verhältniss so aufgefasst, als sollte bei den Vögeln mehr Blut zur Leber geführt werden als bei den Säugern, denn Venen, welche sich bei letzteren in die Hohlvenen ergiessen, wie die Venen der hinteren Extremitäten und des Schwanzes, treten bei den Oviparen in die Pfortader. Andererseits lehrt die eben angestellte Betrachtung, dass die in den Nieren befindliche Anastomose den Zufluss des Blutes zur Leber vermindert, und indem zwei Einrichtungen gegeben sind, welche entgegengesetzte Folgen bedingen, entsteht der Schein eines Widerspruches, der vorläufig kaum lösbar ist.

Die merkwürdigen Anastomosen zwischen Arm- und Schenkelarterien beim Igel, welche unter der Haut an den Seiten des Leibes hinlaufen, sind, wie mich dünkt, sehr gezwungen auf das Zusammenkugeln des Thieres bezogen worden. Es sollte nämlich hierbei ein Druck auf die Aorte stattfinden, welcher den Blutlauf in der unteren Körperhälfte gefährde. — Ebenso dunkel scheinen mir die auffallend grossen Verbindungsäste zwischen den Schlagadern des Kopfes und der unteren Halsgegend bei *falco saxifraga*. — Verständlicher schon sind die so constanten und zahlreichen Anastomosen zwischen den Gekrösarterien. Hier scheint die anatomische Anordnung auf locale Schwankungen der Blutmenge hinzuzielen. Der Theil des Darmkanals, welcher eben im Verdauungsgeschäfte thätig ist, soll muthmasslich einen grösseren Blutzufluss auf Kosten der Partien erhalten, welche unthätig sind.

§ 137. Bisweilen spalten sich Arterien plötzlich in eine Menge unter einander anastomosirender Zweige, welche, ehe sie sich in Capillarnetze auflösen, nochmals in einen oder in einige Stämme zusammentreten. Diese Organisation, welche bekanntlich mit dem Namen Wundernetz *(rete mirabile)* bezeichnet wird, hat also das Eigenthümliche, dass eine obere und eine untere Partie eines Gefässstammes durch zahlreiche Blutkanäle in Verbindung gesetzt werden. In den Venen sind die Wundernetze selten, doch hat v. Bär eine hierher gehörige Bildung im Braunfisch gefunden und abgebildet.*)

Aus dem eben Bemerkten ergiebt sich, dass wir mit einer Einrichtung zu thun haben, deren physikalische Folgen schon in dem Abschnitte über die Bewegung der Flüssigkeiten durch ein System verzweigter Röhren erläutert worden sind (Cap. III). Es werden demnach folgende Behauptungen als hinreichend begründet aufgestellt werden können:

1) Innerhalb des Wundernetzes ist die Bewegung des Blutes

*) Leopoldiner Acten T. XVII. p. 395.

langsamer als in der einerseits mehr centralen, andererseits mehr peripherischen Strecke des einfachen Gefässes, und zwar ist die Blutbewegung im Wundernetze in demselben Grade langsamer, als durch die Vervielfältigung der Collateraläste das Strombett erweitert worden ist.

2) In dem Theile der Arterie, welcher das Blut aus dem Wundernetze abführt, desgleichen in allen von dieser Arterie abhängigen Capillaren, ist die Blutbewegung schneller, als sie sein würde, wenn das Wundernetz nicht vorhanden wäre, vorausgesetzt nämlich, dass die Vermehrung der Stromarme eine Verminderung der Widerstände herbeiführt und somit das Fliessen begünstigt.*)

3) Durch die Gegenwart eines Wundernetzes wird der Blutdruck in jedem Falle vermindert, wenn durch Vervielfältigung der Collateraläste die Widerstände entkräftet werden.

4) Da das Wundernetz eine Erweiterung der Gefässhöhle zur Folge hat, und die Gefässe während des Lebens stets voll sind, so bedingen die Wundernetze eine Vermehrung der Blutmasse, und zwar nicht blos eine locale, sondern einigermassen selbst eine allgemeine.

Man übersieht nach dem Vorausgeschickten die hämodynamischen Vorgänge, welche von der Gegenwart der Wundernetze abhängen, etwas vollständiger als früher, aber für die teleologische Erkenntniss des Organismus ist dennoch sehr wenig gewonnen.

*) In welchen Fällen diese Voraussetzung gültig sei, ist im Allgemeinen nicht anzugeben, aber gewiss nur in sehr wenigen ist sie unzulässig. Wohl in allen Fällen veranlasst das Wundernetz eine beträchtliche Erweiterung der Gefässhöhle, d. h. die Summe der Durchschnittsflächen sämmtlicher Aeste übertrifft um ein Bedeutendes die Durchschnittsfläche des Stammes, aus welchem die Aeste entspringen. Von dieser Seite ist eine Verminderung der Widerstände unzweifelhaft. Indess können in einzelnen Fällen die Aeste in dem Grade geschlängelt sein, dass die hierdurch veranlasste Verlängerung derselben und die Häufung der Gefässwinkel mehr Hindernisse für die Strömung erzeugen, als deren durch Erweiterung des Strombetts beseitigt werden. — Zu vergleichen § 41.

Carlisle fand, dass bei den Tardigraden constant Wundernetze am Oberarme und Oberschenkel vorkommen, welche aus zahlreichen, geradlinig und parallel neben einander verlaufenden Gefässen bestehen. Bei *lemur tardigradus* fanden sich im Armnetze 23, bei *bradypus tridactylus* einige sechzig Aeste, während das Schenkelnetz des ersteren 17, das des letzteren 34 zeigte.*) Diese Aeste anastomosiren unter einander vielfältig, ohne jedoch die reiserartige Vertheilung zu zeigen, welche die Arterien auszeichnet. Erst am unteren oder peripherischen Ende der Wundernetze gehen die einzelnen Zweige ab, welche sich im Unterarm und Unterschenkel verästeln und den Muskeln Blut zuführen. Alle Schlagadern, welche zur Haut und überhaupt zu nicht muskulösen Theilen gehen, verästeln sich dagegen in gewöhnlicher Weise.

Carlisle bezieht nun das Ausserordentliche dieser Organisation auf den trägen Gang der betreffenden Thiere. Er meint, dass das Blut unter den angegebenen Umständen langsamer durch die Muskeln ströme, und ist geneigt anzunehmen, dass eben hiervon das langsamere Muskelspiel abhänge. Obschon diese Deutung von verschiedenen Physiologen angenommen worden ist, so muss sie doch als entschieden unrichtig betrachtet werden. Im Wundernetze selbst fliesst allerdings das Blut langsamer als im Stamme der Arterie, aus welchem jenes entspringt; dagegen ist in den Zweigen, welche das Blut aus dem Wundernetze abführen, die Blutbewegung unfehlbar schneller, als sie gewesen sein würde, wenn die Muskeläste aus einer einfachen Arm- oder Schenkelarterie entsprungen wären. Denn in den von Carlisle beobachteten Fällen kann kein Zweifel sein, dass die vollkommen geraden und hinreichend weiten Aeste, welche in so beträchtlicher Anzahl neben einander liegen, den Durchgang des Blutes begünstigen.**) Fliesst nun das Blut aus dem

*) *Philosophical Transactions*, 1800. pag. 98.

**) Die hier geltenden Grundsätze sind oben Cap. III, besonders § 40 und 41 entwickelt worden. Uebrigens sind die von Carlisle gegebenen Ab-

Wundernetze reichlicher ab, so fliesst es auch den Theilen, welche unterhalb liegen, reichlicher zu, d. h. die Circulation wird in den Muskeln beschleunigt, nicht aber verlangsamt, wie Carlisle behauptete. Ueber den Zweck dieser Einrichtung wage ich keine Vermuthung, nur will ich bemerken, dass kein Grund vorliegt, das Zusammenfallen eines schnellen Blutlaufs und einer trägen Bewegung in den Muskeln für unmöglich zu halten.

Rapp hat das Wundernetz in der Schädelhöhle der Wiederkäuer einer genauen Untersuchung unterworfen und vermuthet, es diene dazu, den Andrang des Blutes gegen das weiche Gehirn zu mässigen. Freilich würde hierbei unklar bleiben, warum nur bei so wenigen Thieren das Gehirn eines solchen Schutzorgans bedurfte. Abgesehen hiervon hängt die Zulässigkeit jener Ansicht davon ab, ob das Wundernetz die Blutbewegung behindert oder begünstigt. Fände Letzteres statt, wie bei den Tardigraden, so wäre die von Rapp empfohlene Ansicht nicht zulässig. Indess besteht das *rete mirabile* der Wiederkäuer aus sehr feinen und vielfältig gewundenen Gefässen, und es wäre wohl möglich, dass die Blutbewegung in diesem Falle gehemmt würde. Gestatten wir uns diese Annahme, so dürften wir das Wundernetz seiner Wirkung nach mit einer halb geschlossenen Ligatur vergleichen. Der Blutdruck würde nach der Seite des Herzens hin über das normale Mass steigen und nach der Peripherie hin unter das normale sinken, also im Gehirne wirklich vermindert sein.*) Gleichzeitig müsste die Geschwindigkeit der Blutbewegung im Gehirne abnehmen, denn bei gleich bleibender Herzkraft ist ein Wachsen der Widerstände nur auf Kosten der Geschwindigkeit denkbar.

Wir sind also bisweilen selbst darüber im Unklaren, ob die

---

bildungen zu vergleichen, welche an den von mir benutzten Apparat verzweigter Röhren erinnern.

*) Ueber das hier Behauptete wird ein späterer Abschnitt Aufschluss geben, in welchem ich den Einfluss der Ligaturen auf die Blutbewegung zur Sprache bringe.

Wundernetze als Beförderungs- oder Hemmungsmittel des Kreislaufs dienen. Vor der Hand ist diese Lücke in unserem Wissen noch ziemlich gleichgültig, da selbst die Hauptfrage, nämlich welche Folgen sich an einen beschleunigten oder verlangsamten Blutlauf knüpfen, noch sehr im Dunkeln liegt.

Ein bisher wohl gänzlich vernachlässigtes Verhältniss ist die Contractilität der Wundernetze, und doch dürfte dies noch am ehesten einige Aufklärung versprechen. Wir sind jeden Falls berechtigt anzunehmen, dass die Zweige eines arteriellen Wundernetzes dieselbe lebendige Contractilität besitzen, welche den Arterien überhaupt zukommt; vielleicht aber ist sie noch grösser, namentlich bei den Netzen, welche in der Schädel- und Rückenmarkshöhle liegen, und welche wahrscheinlich in ähnlicher Weise wie die *arachnoidea* von zahlreichen sympathischen Nerven mit Zweigen versorgt werden. In der That habe ich im *rete mirabile* des Schafs, in der Gegend des verlängerten Markes, Gefässe gefunden, welche auf das Reichlichste mit Nervengeflechten versehen waren, und welche in dieser Beziehung sich fast ebenso ausnahmen als die von Burdach abgebildete Froschhaut.

Sind nun die Zweige des Wundernetzes irritabel, so werden sie, je nach dem Grade ihrer Contraction, bald mehr, bald weniger Blut durchlassen, und das ganze Organ stellt sich dann als ein regulatorischer Apparat dar, welcher die Bestimmung hat, die Geschwindigkeit und den Druck des Blutes in den Theilen zu modificiren, welche von ihnen aus ihr Blut beziehen. Man könnte dies auch so ausdrücken: Theile, welche ihr Blut durch Vermittlung eines Wundernetzes erhalten, sind in Bezug auf die Geschwindigkeit und den Druck des Blutes eines grösseren und schnelleren Wechsels der Zustände fähig als andere Organe. Natürlich würden solche Theile dann auch grösseren Schwankungen in denjenigen Functionen unterliegen, welche mit den angedeuteten Verhältnissen des Blutlebens in ursächlicher Beziehung stehen.

Im Inneren der Schädelhöhle würden solche contractile Wun-

dernetze noch von besonderem Einflusse auf die Blutmenge des Gehirns sein. Denn da die in der festen Schädelhöhle befindliche Blutmasse im Ganzen genommen wohl nur wenig veränderlich sein kann, so wird sich zwischen dem Wundernetze und den Capillaren des Gehirns ein gewisser Antagonismus herausstellen; es wird Hyperhämie des ersteren Anämie des letzteren bedingen und umgekehrt.

§ 138. Abercrombie behauptet sogar, dass die Blutmenge im Inneren der Schädelhöhle eine vollkommen constante sei und sein müsse. Er beruft sich zunächst auf die Erfahrung, dass das Gehirn und seine Häute bei abgeschlachteten Thieren mit Blut erfüllte Gefässe zeigen.*) Dasselbe soll sich zeigen, wenn man den Schädel enthaupteter Menschen öffnet. Untersucht man dagegen den Leichnam erhenkter Personen, so findet sich in den Weichtheilen, welche den Schädel bedecken, eine auffallende Ueberfüllung der Gefässe; es fliesst bei Durchschneidung der Kopfhaut bisweilen 1 Pfund Blut ab, während die in der Schädelhöhle gelegenen Organe zwar wiederum gefüllte Adern, aber durchaus keine Spuren von Hyperhämie darbieten.

Solche Erfahrungen scheinen allerdings anzudeuten, dass die in der Schädelhöhle befindlichen Gefässe von solchen Einflüssen, welche die Blutmenge in den äusseren Kopftheilen verändern, in sehr geringem Masse berührt werden. Abercrombie behauptet nun, dass die Unveränderlichkeit der Blutmenge durch die anatomischen Verhältnisse, nämlich durch die Härte und Unnachgiebigkeit der Theile, welche das Gehirn einschliessen, nothwendig bedingt sei. Eine Vermehrung des Hirnblutes würde nur möglich sein, wenn die Gefässe sich erweiterten, aber eine Erweiterung dieser ist seiner Ansicht nach deshalb unmöglich,

*) Auch ich habe diese Beobachtung sehr häufig gemacht und kann hinzufügen, dass die Theile, welche innerhalb und ausserhalb der Schädelhöhle liegen, den verschiedensten Anblick gewähren. Im Inneren erscheinen alle Gefässe wie mit Blut injicirt, in den äusseren Partien dagegen vollkommen leer.

weil die von den harten Schädeldecken umgebene Hirnmasse nicht weichen kann. Wiederum könne eine Verminderung der Blutmenge des Gehirns nur dann eintreten, wenn die Gefässe, welche das Blut führen, sich verengten, aber in einer luftdicht geschlossenen knöchernen Höhle sei ein Collapsus derselben nicht denkbar.

Diese Schlussfolge würde unwiderleglich sein, wenn nicht die Hirnhöhlen Wasser enthielten, für welches im vierten Ventrikel ein Ausgang in den Wirbelkanal offen stände. Kann aber das Wasser der Hirnhöhlen entweichen, so kann auch die Hirnsubstanz dem Andrange der erweiterten Gefässe nachgeben.

Obschon die physikalischen Gründe, auf welche Abercrombie seine Lehre stützt, nicht Stich halten, so können doch die Erfahrungen, auf welche er sich beruft, nicht unberücksichtigt bleiben. Immerhin scheint man einräumen zu müssen, dass die Blutmenge der in der Schädelhöhle eingeschlossenen Theile weit geringeren Wechseln unterliege als die Blutmenge der übrigen Organe. Dies hängt vielleicht damit zusammen, dass der Austritt des Hirnwassers in den Wirbelkanal Schwierigkeiten findet. Bedenkt man, dass das Wasser, welches die Hirnhöhlen erfüllt, nur dann austreten kann, wenn es zwischen das Rückenmark und die dasselbe umgebenden festen und schwer ausdehnbaren Häute dringt, so wird man wahrscheinlich finden, dass ziemlich ansehnliche Kräfte dazu gehören, um jenen Austritt möglich zu machen.*)

§ 139. Der Augenschein lehrt, dass die rechte Herzhälfte um ein Ansehnliches weiter ist als die linke; demnach enthält sie auch mehr Blut. Demohngeachtet contrahiren sich die Herzkam-

*) Die Ohnmacht, welche nach Magendies Versuchen bei Abzapfung der Cerebrospinalflüssigkeit eintritt, bezieht sich vielleicht weniger auf die Wichtigkeit dieses Fluidums an sich, als auf die Hyperhämie, welche durch den Abfluss derselben veranlasst wird. Ein leerer Raum kann in der Schädelhöhle unmöglich entstehen; der Verlust an Cerebrospinalflüssigkeit wird durch Zufluss von Blut ausgeglichen werden müssen. Die Gefässe erweitern sich also und bedingen die lebensgefährlichen Zufälle muthmasslich dadurch, dass sie die Hirnfasern aus einander drängen.

mern gleich häufig, und folglich kann die linke Kammer mit einer Systole nicht weniger entleeren, als ihr die rechte Kammer mit einer Systole zutreibt. Es sind nur zwei Annahmen möglich. Entweder tritt bei Contraction des rechten Ventrikels mehr Blut rückwärts in den Vorhof als bei Zusammenziehung des linken, oder die rechte Kammer contrahirt sich weniger vollständig als die linke, was ich mit Wedel für wahrscheinlicher halte.

Anders freilich urtheilte Haller, welcher die Annahme, dass der rechte Ventrikel sich unvollständig entleere, als eine mathematisch unmögliche betrachtet. Er sagt: Setzen wir die Capacität des Ventrikels $= a + x$, das Blutquantum, welches mit einem Pulse entleert wird, $= a$ und die Masse, welche nicht entleert wird, $= x$, so bleibt nach dem ersten Pulse im Herzen $1\ x$, nach dem zweiten $2\ x$, nach dem tausendsten $1000\ x$.*) Das Irrige dieser Behauptung liegt am Tage. Wenn in 1000 Pulsen $1000\ a$ entleert werden, so werden in 1000 Expansionen des Herzens auch nur $1000\ a$ aufgenommen, nicht aber $1000\ (a + x)$, wie nöthig wäre, um das Zurückbleiben von $1000\ x$ zu ermöglichen. Uebrigens widerspricht sich Haller selbst, indem er an einer anderen Stelle zugiebt, dass kleine Blutmengen wohl im Herzen zurückgehalten werden können.**)

§ 140. Aus einem früheren Abschnitte (Cap. II) ergiebt sich, dass die verschiedenen Weiten der Gefässhöhle verschiedene Geschwindigkeiten der Blutbewegung bedingen. Nach hydrostatischen Gesetzen verhält sich die Geschwindigkeit einer Flüssigkeit, welche durch Röhren strömt, umgekehrt wie die Weite dieser. Wenn Oesterreicher die Anwendbarkeit dieses Gesetzes auf den lebenden Körper mit der Bemerkung leugnet, es könnten in den erweiterten Abschnitten des Gefässsystems, wo das Blut langsamer fliessen sollte, neue bewegende Momente hinzukommen, so hat er hiermit nur bewiesen, wie wenig er Physiker

*) *Elementa physiol. I.* 220.
**) Ebendaselbst pag. 397.

ist. *) Eine Kraft, welche dem Blute der erweiterten Gefässhöhle eine örtlich beschleunigte Bewegung mittheilte, würde dieses Blut von der nachströmenden Masse trennen und zwischen beiden einen leeren Raum erzeugen! Das physikalisch Unzulässige einer solchen Annahme bedarf keines Beweises.

Im Allgemeinen darf man sagen, dass die Arterien durch Spaltung in Aeste eine Erweiterung ihrer Höhle erfahren. Allerdings kommen Ausnahmen von diesem Gesetze vor, wie ich beispielsweise im Pferde die Summe der Durchschnittsflächen beider Carotiden constant geringer fand als den Querschnitt des Stammes, aus welchem sie entspringen; indess scheinen derartige Ausnahmen doch sehr selten zu sein. Die ersten Spaltungen der *arteria aorta* und *pulmonalis* haben auf die Erweiterung der Gefässhöhle nur einen sehr geringen Einfluss, aber je häufiger sich Arterien schon verzweigt haben, um so wirksamer pflegt ihre Spaltung für die Erweiterung des Strombetts zu sein. In der Nähe der Haargefässe sind die Zweige eines Stämmchens fast so weit als dieses selbst, d. h. die Durchschnittsfläche der Gefässhöhle wächst hier mit jeder Spaltung fast um das Doppelte. Hiernach ist anzunehmen, dass die Geschwindigkeit der Blutbewegung von den arteriellen Stämmen gegen die feineren Zweige allmälig abnehme, anfangs nur wenig, dann mehr und überhaupt, je näher den Capillaren, um so rascher. Hiermit in Uebereinstimmung sind die mikroskopischen Beobachtungen an durchsichtigen Theilen, welche nicht nur die progressive Abnahme der Stromschnelle im Allgemeinen bestätigen, sondern auch lehren, dass die Abnahme in den feinsten Verzweigungen in schnellster Progression erfolge.

In den Venen gestalten sich die Verhältnisse genau umgekehrt als in den Arterien. Zwei Venenzweige vereinen sich zu einem Venenstamme und veranlassen durch Verengerung der Gefässhöhle eine Beschleunigung des Blutlaufs.

*) Dr. J. H. Oesterreicher, Versuch einer Darstellung der Lehre vom Kreislaufe des Blutes. Nürnberg 1826.

Wäre es möglich, die aus den Gefässspaltungen hervorgehende Erweiterung des Strombetts durch Messungen zu bestimmen, so wüsste man, wie die Geschwindigkeit der Blutbewegung in den verschiedenen Abschnitten des Gefässsystems sich änderte. Leider sind solche Messungen nicht ausführbar. Eine unerlässliche Bedingung der Genauigkeit würde sein, die Gefässe vor deren Messung zu injiciren, und zwar entweder unter Einwirkung desselben Drucks, welchem sie während des Lebens unterliegen, oder mindestens eines durch die ganze Ausdehnung des Gefässsystems proportionalen Drucks. Im lebenden Körper nimmt der Druck abwärts vom Herzen allmälig ab, weil er abhängig von den Widerstandsursachen ist. Diese allmälige Abnahme würde sich bei der künstlichen Injection nicht nachahmen lassen. Denn von dem Momente an, wo die Injectionsmasse nicht weiter dringt, wirkt der Druck der Spritze auf alle Gefässe mit gleicher Kraft und dehnt also die vom Herzen entfernter liegenden Zweige mehr aus, als sie im Verhältniss zu den näher liegenden Stämmen ausgedehnt werden sollten.

Die anatomische Erkenntniss des Gefässsystems wird nie bis zu dem Punkte gelangen, wo man aus der bekannten Breite seiner Höhle in dem einen oder anderen Abschnitte auf die bezügliche Geschwindigkeit der Blutbewegung folgern könnte. Eher ist das Umgekehrte möglich, d. h. man kann aus der Geschwindigkeit, mit welcher das Blut in verschiedenen Theilen fliesst, gewisse Schlüsse auf die Weite der Gefässhöhle in den respectiven Theilen machen.

Nicht ohne Interesse für den hier behandelten Gegenstand sind einige mit Hülfe des Hämodromometers ausgeführte Messungen der Blutgeschwindigkeit, welche schon oben § 99 und 104 mitgetheilt wurden. Wir fanden, dass die mittlere Geschwindigkeit des Blutes im Anfange der Aorte der Haussäugethiere ungefähr 400 Mill. beträgt. Andererseits lehrte die Erfahrung, dass Gefässe, welche sich vom Ursprunge der Aorte ansehnlich entfernten, ja selbst solche, welche ganz nahe am Ende der arteriellen

Strömung liegen, eine Geschwindigkeit des Blutstroms zeigen, welche der in der Aorte beobachteten sehr nahe kommt. Wir fanden *v* in der Kopfschlagader vieler Säuger ungefähr 300 Mm., in der *arteria maxillaris* eines Pferdes 232 und in einem anderen Individuum 99, endlich in der *arteria metatarsi* desselben Thieres immer noch 56 Mm. Halten wir uns an den letzten, sehr merkwürdigen Fall, so hat die Blutgeschwindigkeit in einem Gefässe, welches unmittelbar an der Grenze der Capillaren liegt, immer erst um das Siebenfache abgenommen, während in den Haargefässen selbst die Blutbewegung 600 — 800 Mal langsamer vor sich geht als in der Aorte. Hieraus ergiebt sich, dass die Erweiterung des Gefässsystems in den Arterienverzweigungen nur sehr geringfügig ist, und dass die Gefässhöhle erst in den Capillaren eine fast plötzliche und ausserordentliche Erweiterung erfährt.

Man hat die Gestalt der Gefässhöhle oft mit der zweier Kegel verglichen, welche mit ihren Grundflächen an einander stossen, indess hat ein derartiges Bild durchaus nichts Bezeichnendes. Viel passender würde man die Region der Capillaren mit einem See vergleichen, welcher durch die arteriellen Ströme seinen Zufluss erhält, und aus welchem die Venen die Blutflüssigkeit wieder abführen.

Für die Physiologie des Kreislaufs sind diese Erörterungen gar nicht gleichgültig. Das Blut strömt mit sehr beträchtlicher und im Verfolge der Gefässvertheilung nur wenig abnehmender Schnelligkeit durch die Arterien, bewegt sich überaus langsam durch die Capillaren und wird, sobald es letztere verlässt, wieder sehr rasch durch die venösen Ströme zum Herzen zurückgeführt. Dieser grosse und plötzliche Wechsel der Geschwindigkeit bezeichnet eine wesentliche Verschiedenheit in der physiologischen Aufgabe der Arterien und Venen einerseits und der Capillaren andererseits. Die langsame Bewegung in den dünnwandigen Capillaren begünstigt den Stoffwechsel zwischen Blut und Körpermasse, während die Rapidität der arteriellen und

venösen Ströme einen Austausch der Stoffe unmöglich macht. Auf diese Weise stellt sich schärfer heraus, dass Arterien und Venen die untergeordnete Rolle von Kanälen spielen, welche Herz und Haargefässe in Verbindung setzen. Diese mechanische Aufgabe kann bei den verschiedensten Dispositionen der Gefässe erreicht werden; darum finden sich auch in den anatomischen Anordnungen so zahllose, allem Anscheine nach ganz gleichgültige Varietäten.

Man kann also aus der Geschwindigkeit der Blutbewegung auf die Weite der Gefässhöhle und umgekehrt aus der gemessenen Weite dieser auf die Schnelligkeit der Strömung folgern; indess können derartige Schätzungen im speziellen Falle nie sehr genau sein, selbst dann nicht, wenn die Messungen, die man der Rechnung zu Grunde legt, das grösste Zutrauen verdienen. Der Grund hiervon liegt darin, dass die Gefässhöhle kein einfacher Schlauch ist, sondern aus einem Systeme verzweigter Röhren besteht. Unter solchen Umständen hängt die Stromschnelle nicht blos von der Weite des bezüglichen Gefässes ab, sondern ausserdem noch von der Weite des Abschnittes der Gefässhöhle, dem es als Collateralast zugetheilt ist. Es kann also in Gefässen von gleichem Durchmesser die Geschwindigkeit der Strömung sehr verschieden sein, wenn dem einen viele, dem anderen wenige Collateraläste zur Seite liegen, und umgekehrt kann in Gefässen von verschiedener Weite dieselbe Stromschnelle gefunden werden, wiederum weil die Disposition der Collateralarme für die Geschwindigkeit der Bewegung das Entscheidende ist.

§ 141. In dem Abschnitte, welcher die Bewegung der Flüssigkeiten durch verzweigte Röhren behandelt, ist bereits beiläufig auf die Haargefässe Rücksicht genommen und erwiesen worden, dass der Widerstand, welchen ein Haargefäss der blutbewegenden Kraft entgegensetzt, durch Vervielfältigung der Capillaren vermindert und nicht etwa vermehrt werde. Es kann nun einen Augenblick zweifelhaft scheinen, mit welchem Rechte

die Physiologie die Haargefässe als Hemmnisse betrachte; eine kurze Betrachtung reicht aus, dies nachzuweisen.

Zunächst ist klar, dass Capillaren die Blutbewegung nur dann begünstigen können, wenn sie als Collateralarme neben einander liegen und den strömenden Massen eine vermehrte Gelegenheit zum Abzug bieten. Liegen die Haargefässe statt neben-, hinter einander, d. h. sind mehrere Capillarsysteme vorhanden, durch welche das Blut in der Zeitfolge strömen muss, so fällt nicht nur der Vortheil, dessen eben gedacht wurde, weg, sondern es summiren sich die Hemmnisse natürlich wie die Anzahl der Haargefässe, welche dem Blutstrome zum Durchgang dienen. So ist das Pfortadersystem, welches das Blut nöthigt, durch die Capillaren der Leber zu dringen, nachdem es vorher schon ein Mal durch die Haargefässe anderer Organe setzte, natürlich ein mächtiges Hinderniss, und bei den Fischen, deren einfaches Herz das Blut nach und nach durch 3 Capillarsysteme (der Kiemen, des Körpers und der Leber) zu treiben hat, wächst der Widerstand auf sein Maximum.

Zweitens aber sind die Capillaren, obschon förderlich für den Abfluss durch die Vermehrung der Collateralarme, doch in noch höherem Masse hinderlich durch ihre ausserordentliche Enge. Ich meine, die Hemmnisse, welche dem Blutstrome entgegen treten, würden geringer sein, wenn die Haargefässe ganz fehlten, und wenn weite Arterien unmittelbar in weite Venen umbögen.

Es kommt nun in einigen Thieren wirklich vor, dass gewisse Arterien und Venen durch weitere Anastomosen unmittelbar zusammenhängen. So habe ich bei einigen Wiederkäuern, namentlich beim Rehe und Dammhirsche, die Bemerkung gemacht, dass grobe Injectionsmassen, welche in die Kopfschlagader eingespritzt wurden, mit grösster Leichtigkeit durch die Drosselvenen wieder abliefen. Eine solche Einrichtung kann nicht ohne erhebliche Folgen für den Kreislauf bleiben, es muss das Blut durch die weitere Anastomose schneller und folglich durch die Capillaren

ihrer Collateralarme um so langsamer fliessen.*) Bei den Wiederkäuern, die ich injicirte, fanden sich diese weiteren Anastomosen in der Verzweigung der *carotis externa,* deren Collateralsystem durch die Verästelungen der *carotis interna* gegeben ist; man würde demnach annehmen müssen, dass bei jenen Individuen das Blut durch die äusseren Kopftheile besonders schnell, durch das Gehirn dagegen ungewöhnlich langsam geflossen sei.

Die eben angestellten Betrachtungen wiederholen sich, wenn man das Verhältniss der Körpervenen zu den Zweigen der Pfortader in Erwägung zieht. Die Einschiebung des Pfortadersystems zwischen die Darmvenen und den Stamm der *vena cava inferior,* führt einen Theil des Körperblutes durch zwei Capillarnetze, während das übrige nur durch ein solches Netz zu treten hat. Da in beiden Fällen das Blut aus der Aorte kommt und in die untere Hohlvene zurückfliesst, so bestehen gleichsam neben einander und als Collateralarme zwei Blutbahnen, welche sich dadurch unterscheiden, dass die Bahn, welche durch die Leber führt, mehr Widerstände bietet als die andere. Natürlich muss nun das Blut, welches die Bahn der Pfortader einschlägt, langsamer fliessen.

In den Capillaren der Leber treffen Blutmassen, welche Bahnen von ungleicher Länge und Schwierigkeit durchströmt haben, zusammen, und die verschiedene Schnelligkeit, mit welcher sie sich bewegten, kommt hier zur Ausgleichung. Wenn nun bemerkt worden ist, das träge Pfortaderblut würde in den Haargefässen der Leber durch das rascher einströmende Blut der Schlagader mit fortgerissen, so ist andererseits ebenso richtig, dass das schneller strömende Blut, welches aus der Leberarterie eintritt, durch das Pfortaderblut aufgehalten werde.

---

*) Der vollständige Beweis für diese an sich kaum zweifelhaften Behauptungen liegt in dem § 37 mitgetheilten Versuche. In einem verzweigten Röhrensysteme floss das Wasser durch zwei Arme von ungleicher Weite mit ungleicher Schnelligkeit, nämlich rascher durch den weiten und langsamer durch den engen.

§ 142. Da die Wandungen der Blutgefässe im Stande sein müssen, dem Blutdrucke zu widerstehen, so bedürfen gewisse Gefässe stärkerer Wandungen als andere. Die Arterien sind dickwandiger als die Venen, was dem stärkeren Drucke, welchem sie ausgesetzt sind, vollkommen entspricht; dagegen sind die Wandungen der Haargefässe feiner als die der Venen, obschon der Blutdruck in ihnen sicherlich stärker ist (§ 39). Hierin liegt nichts Widersprechendes, denn die Gefahr des Reissens der Blutgefässe wächst nicht nur direct wie der Seitendruck des Blutes, sondern auch direct wie ihr Umfang, so dass in den feinsten Capillaren jene Gefahr sehr klein ist.

Zwar hat Ludwig geleugnet, dass auf den Umfang der Gefässe etwas ankomme, doch beruht dies auf einem Missverständnisse. Derselbe bemerkt, unter Voraussetzung eines gleichen Drucks im ganzen Arteriensysteme müsse offenbar auf jedem Punkt jeder Arterie derselbe Druck lasten, und scheint hieran den Schluss zu knüpfen, dass, weil die Zerreissung der Wandungen doch nur an einem Punkte beginnen könne, die Gefahr des Reissens in grossen und kleinen Arterien dieselbe sein werde. Diese Schlussfolge ist nicht zulässig. Nach hydrostatischen Gesetzen verhält sich der Druck eines Fluidums wie das Product aus der Druckhöhe in die gedrückte Fläche. Demnach hat jede Kreisfaser, welche reifenartig um das Blutgefäss gelagert ist, einen Druck auszuhalten, welcher ihrer Länge proportional ist. Durch die Totalität des Drucks wird sie ausgedehnt und unter Umständen zerrissen, allerdings an einem Punkte, aber nicht durch den Druck, welcher auf diesen einen Punkt wirkte, sondern durch den, welcher expandirend die ganze Faser in Anspruch nahm.

Bei dieser Betrachtungsweise ist nicht auffallend, dass die Haargefässe trotz ihrer unendlich dünnen Wandungen einem bedeutenden statischen Drucke zu widerstehen vermögen. Berechnen wir, welchen Druck ein Abschnitt eines Capillargefässes auszuhalten habe, dessen Durchmesser und dessen Länge dem

Durchmesser eines menschlichen Blutkörperchens, also ungefähr der Grösse von 0,006 Mill. gleichkommt. Unter dieser Voraussetzung beträgt die Peripherie der Capillare 0,01884 Mill., die Quadratfläche des ganzen Abschnitts 0,000113□Mill. Setzen wir nun den Seitendruck im Anfange des arteriellen Systems = 2000 Mill. Wasserhöhe und demgemäss den Druck in den Haargefässen etwa 1200 Mill., so lastet auf dem in Frage stehenden Capillarsegment ein Gewicht, welches dem von 0,135 Mill. Cub. Wasser oder 0,000135 Gr. gleichkommt. Ein so unendlich kleiner Druck kann von unendlich dünnen Wandungen ertragen werden, oder vielmehr ein Blutströmchen, welches so geringen örtlichen Druck veranlasst, würde selbst ohne alle Gefässwandungen durch die Cohärenz der Elementartheile in seiner Bahn erhalten werden. Dem entspricht auch die Erfahrung; denn wenn man mit einer sehr feinen Nadel in die Haut sticht, so entsteht trotz der Zerreissung von Capillaren kein merkliches Extravasat. *)

§ 143. Ich werde den Druck, welchen eine Gefässwandung auszuhalten hat, und welcher das Product aus der Widerstandshöhe in die gedrückte Fläche ist, den hämodynamischen nennen und die Frage erörtern, ob etwa die Dicke der Gefässwandungen diesem Drucke proportional sei. Die Erfahrung widersetzt sich einer solchen Annahme auf das Entschiedenste. Erstens nämlich ist die Dicke der Gefässwandung in demselben Querschnitte oft sehr verschieden, namentlich in den grösseren Arterienstämmen. In der Aorte eines Rindes z. B. verhielt sich die dünnste Stelle der Wandung zur dicksten an mehreren Stellen wie 1 : 2. Zweitens kommen nicht selten Fälle vor, wo Arterien in ihrem Verlaufe enger und doch dickwandiger werden. Die *aorta descendens* eines erwachsenen Rindes hatte 4 Centimeter unterhalb ihres Ursprungs 24 Mill. Durchmesser im Lichten und eine mittlere Dicke der Wandungen von 5,5 Mill., während 8 Centimeter weiter ab-

*) Nach dem Vorausgeschickten bedarf es kaum der Bemerkung, dass der Mangel eines Extravasats nicht etwa beweist, dass der statische Druck in den Haargefässen annäherungsweise = 0 sei.

wärts der Diameter im Lichten 23,5 Mill. und die mittlere Stärke der Wandungen 7,5 Mill. betrug. Ueberhaupt ist der Ursprung der Aorte sehr häufig dünnwandiger als die Stelle unterhalb der grossen Gefässe, welche sich zum Kopfe begeben. Drittens endlich sind die Hohlvenen nahe an dem Vorhofe sehr dick, obschon der absolute Druck an dieser Stelle ungemein geringfügig sein muss, da der eine Factor desselben, der hämodynamische Druck, nahezu = 0 ist.

Bei reiflicher Ueberlegung findet man bald, dass es ganz zweckwidrig sein würde, wenn die Dicke der Gefässwandungen dem hämodynamischen Drucke proportional wäre, denn die Gefässe haben noch einen anderen Druck auszuhalten als diesen. Man wird nicht zweifeln, dass ich den Druck der Schwere meine. Da nämlich alle Capillaren unter einander zusammenhängen, so kann der menschliche Körper mit einem einzigen grossen Behälter verglichen werden, dessen zahlreiche und wunderbar gestaltete Zwischenwandungen nicht hindern können, dass die nach oben befindliche Blutmasse auf der unteren laste. Sehr bekannte Erscheinungen beweisen, dass das Blut im lebenden Körper allerdings unter dem Einflusse der Schwere stehe. Wenn man sich längere Zeit bückt, entstehen Congestionen nach dem Kopfe, und wenn man einen Arm hoch über den Kopf erhebt, während der andere lose nach unten hängt, erblasst die erhobene Hand, während die unten befindliche sich röthet. Denken wir uns also einen Menschen in aufrechter Stellung, so befindet sich das Blut seiner Füsse, ganz abgesehen vom hämodynamischen Drucke, noch unter dem Drucke einer Blutsäule, deren Höhe der Körpergrösse gleichkommt, während in den Blutgefässen der Kopfhaut dieser Druck ganz fehlt. Sollte also die Dicke der Gefässwandungen dem Drucke proportional sein, welchen sie auszuhalten haben, so müssten die Gefässe in jedem tiefer liegenden Körpertheile dickere Wandungen haben als die Gefässe in einem höher liegenden. Aber eine solche Einrichtung wäre abermals zweckwidrig oder vielmehr unmöglich, da bei der Willkür unserer

Bewegungen die relative Lage der Theile zu einander eine veränderliche ist. Hierzu kommt noch, dass der Druck auf ein rückführendes Gefäss eine Stauung veranlassen kann, welche den Andrang des Blutes gegen die Wandungen ausserordentlich steigert.

Nach dem Vorhergehenden wird man natürlich finden, dass eine bestimmte Proportion zwischen der Dicke der Gefässwandungen und dem Drucke, welchen sie auszuhalten haben, nicht stattfinde. Der Blutdruck ist in hohem Grade veränderlich, und so konnte die Aufgabe der bildenden Kraft nur die sein, den Gefässwandungen eine Dicke zu geben, welche auch dem stärksten Druck, der vorkommt, zu widerstehen vermochte. Wie nun der Organismus überhaupt für Alles, was zu den Lebenszwecken dient, in sehr freigebiger Weise sorgt, so hat er auch den Gefässwandungen eine Stärke und Haltbarkeit gegeben, welche über die gewöhnlichen Bedürfnisse weit hinausreicht. Ich werde im Nachstehenden einige Beobachtungen mittheilen, welche zur Bestätigung des Gesagten dienen.

Die Carotis eines geschlachteten Hammels hatte einen Durchmesser von 3 Millim. im Lichten, und die Dicke ihrer Wandungen betrug $\frac{3}{4}$ Mill. Ich befestigte diese Arterie an dem rechtwinklig umgebogenen unteren Ende einer sehr langen Glasröhre, welche nach und nach mit Quecksilber gefüllt wurde. Letzteres füllte zuletzt die Röhre vollständig und erreichte hiermit eine Druckhöhe von 2,25 Meter. Trotz dieses ausserordentlichen Drucks, welcher den natürlichen ungefähr um das 14fache übertraf, wurden die Wandungen nicht zersprengt.

Ein zweiter Versuch wurde mit der *arteria carotis* eines Ochsen angestellt. Das Lumen derselben betrug 4,5 Mill. im Durchmesser, die Dicke der Wandungen 2,75 Mill. Das Gefäss ertrug einen Druck von 2,23 Meter Quecksilber, bei welchem es zwar nicht platzte, aber Quecksilberkügelchen in Menge ausspritzte. Die Ursache hiervon schien in dem Zerreissen der *vasa vasorum* zu liegen.

Die Jugularvene desselben Stieres platzte erst bei einem Drucke von 1,55 Quecksilber, also bei einem Drucke, welcher gegen 100 Mal grösser ist als derjenige, welchen die Vene unter normalen Verhältnissen zu tragen hat.

§ 144. Wenn ich im Vorhergehenden leugnete, dass die Dickwandigkeit der Blutgefässe in einer bestimmten Proportion zum Blutdrucke stehe, so konnte ich nicht in Abrede stellen wollen, dass bei der Entwickelung der Gefässwandungen der Blutdruck die nöthige Berücksichtigung finde. Eine solche spricht sich nicht nur in dem Umstande aus, dass die Arterien im Allgemeinen stärkere Wandungen haben als die Venen, sondern sie ergiebt sich auch aus der verschiedenen Dickwandigkeit der Gefässstämme und Gefässzweige, welche in den Arterien ein ganz anderes Verhältniss zeigt als in den Venen. Offenbar nimmt die Dicke der Gefässwandungen, von den Stämmen gegen die Zweige gerechnet, in den Arterien viel schneller ab als in den Venen, wie ganz einfach die Thatsache beweist, dass die Aorte und Lungenarterie viel stärkere Wandungen haben als die bezüglichen Hohl- und Lungenvenenstämme. Dieser Unterschied im Baue beider Systeme erklärt sich eben aus den Druckverhältnissen. In den Arterien nimmt der Druck, welcher die Wandungen gefährdet, von den Stämmen gegen die Aeste aus zwei Gründen ab, einmal, weil der Seitendruck abwärts vom Ventrikel eine Verminderung erfährt, und dann, weil der Durchmesser der Gefässe immer geringer wird. In den Venen findet Letzteres zwar auch statt, dagegen wächst der Seitendruck vom Vorhofe gegen die Capillaren hinwärts und gefährdet also die Wandungen der grossen Stämme nicht mehr, sondern weniger als die der kleinen Zweige. Mit Bezug auf diesen Umstand konnten die Venen Wandungen von mehr gleichmässiger Dicke als die Arterien erhalten.

§ 145. Die grossen Venen sind bei den Wirbelthieren durchgängig weiter als die entsprechenden Arterienstämme, und in der Mehrzahl der Fälle dürfte der Unterschied ein ziemlich an-

sehnlicher sein. Die unvermeidliche Folge dieser Einrichtung ist die, dass das Blut in den grossen Venenstämmen weit langsamer fliesst als in den grossen Schlagadern, nur bleibt vorläufig unklar, worauf dieser so constante Unterschied der Geschwindigkeit hinziele. Vielleicht ist die Auflösung des Räthsels in den Verhältnissen des Blutdrucks zu suchen. Wir haben gefunden, dass zwei distante Punkte im Gefässsysteme einem verschiedenen Drucke ausgesetzt sind, und weiter ergab sich, dass diese Druckdifferenz eine Function der Geschwindigkeit und nach der Formel $w = av^2 + bv$ berechenbar sei. Ist die Stromschnelle in den Venen durch die relative Weite des Strombetts auffallend beschränkt, so ist auch die erwähnte Druckdifferenz in hohem Masse vermindert, d. h. der Blutdruck nimmt von den Stämmen gegen die Zweige bei Weitem nicht so rasch zu, als er zugenommen haben würde, wenn die Blutbewegung schneller gewesen wäre. Man könnte sich nun denken, dass eine raschere Zunahme des Drucks in der angegebenen Richtung Inconvenienzen bei der Bildung der Venenwandungen nach sich gezogen haben würde. Die Zunahme des Blutdrucks gegen die Haargefässe würde ein allmäliges Dickerwerden der Venenwandungen in eben dieser Richtung erfordern, wenn nicht die Abnahme der Gefässdurchmesser von den Stämmen gegen die Zweige das Verhältniss änderte. Die Verminderung der Gefässweite wird zum Schutzmittel gegen das Anwachsen des Blutdrucks, und jene wie dieses sind von der bildenden Kraft so glücklich in Rechnung gebracht, dass nicht nur kein Dickerwerden der Venenwandungen von den Stämmen gegen die Zweige nöthig, sondern sogar die erforderliche Verdünnung derselben möglich wurde. Die Venen mussten nach der Seite der Haargefässe dünnwandiger werden, um den Anforderungen des Stoffwechsels genügen zu können, und die Verdünnung der Wandungen war vielleicht eben nur ausführbar, wenn der Druck gegen die Peripherie hin so wenig zunahm, als dies bei der Langsamkeit des venösen Blutstroms wirklich der Fall ist.

In einigen Thieren ist die Erweiterung der Venenstämme so auffallend, dass ich die eben aufgestellte, ohnehin problematische Hypothese auf sie nicht anwenden möchte. Bei vielen Taucherthieren bilden die Hohlvenen grosse sackförmige Erweiterungen, welche nach Meckel den Durchmesser der Aorte bisweilen um das Sechsfache übertreffen.*) Einige Physiologen und, wie es scheint, Meckel selbst nehmen an, dass diese sackförmigen Erweiterungen als Behälter des Blutes während des Tauchens dienen, was die Voraussetzung einschliesst, dass das Blut während dieser Zeit nicht durch die Lungen strömen könne oder nicht durchströmen solle. Ich bekenne, dass ich für diese Annahme keine genügenden Gründe sehe.

Cap. XII.

Von den Kräften, welche das Blut bewegen.

§ 146. Kein Abschnitt in der Lehre vom Blutkreislaufe hat Anlass zu so viel Streitigkeiten gegeben als derjenige, wo es sich um die Ursachen der Bewegung handelte. Auf diesem Gebiete war es, wo die Anhänger spezifischer Lebenskräfte einerseits und die Mechaniker andererseits am härtesten gegen einander stiessen; wir selbst können es nicht betreten, ohne für die Einen oder Anderen Partei zu nehmen.

Bestände die Blutbewegung durchaus nur in einem Kreislaufe der ernährenden Säfte, und vertheilte sich die bewegende Kraft vollkommen gleichmässig über alle Zweige eines Gefässstammes,

*) Meckel fand dies Verhältniss bei *mergus serrator* und *merganser*. Anmerkung zu Cuvier vergl. Anat. IV. S. 122. Man vergl. auch Meckels System der vergl. Anatom. V. § 108.

so stände der mechanischen Auffassung des Vorganges kein Hinderniss entgegen. Allein das Blut strömt vorzugsweise nach den Theilen, welche sich im Zustande lebendiger Erregung befinden, und dient gerade durch die Ungleichheit, mit der es sich in die vorhandenen Gefässbahnen vertheilt, den Lebenszwecken. Hier schienen mechanische Erklärungen unzulänglich, und man fühlte das Bedürfniss, ein intelligentes Prinzip an die Spitze der Ursachen zu stellen.

Die Mechaniker unter den Physiologen würden ein verlorenes Spiel spielen, wenn sie die Zweckmässigkeit jener Lebensvorgänge leugnen oder auch nur die Mitwirkung eines intelligenten Prinzips, als letzten Gliedes in der Kette der Ursachen, in Frage stellen wollten. Ersteres haben die Mechaniker meines Wissens nie gethan, geschah Letzteres von Einzelnen, so fällt es nur ihnen zur Last und nicht der Schule. Es giebt eine organische Physik, welche mehr nicht beansprucht als nachzuweisen, wie das Lebensprinzip zur Erreichung seiner Zwecke sich physischer Mittel bediene. Dass dies in einzelnen Fällen geschehe, z. B. bei der Brechung des Lichtes zur Herstellung des Netzhautbildes, ist unverkennbar, es wird also zu den Aufgaben der Physiologie gehören, nachzuweisen, in welchen speziellen Fällen die physischen Mittel in Anwendung kommen. Ich werde, wie in allen vorhergehenden Abschnitten, so in den folgenden die Untersuchung in diesem Sinne führen, und werde die missliche Frage, ob derartige Mittel zur Herstellung der Lebensverrichtungen in allen Fällen ausreichen, ganz offen lassen. *)

§ 147. Mit Harveys Darstellung des Blutkreislaufs war nicht nur das Wesentliche in den Erscheinungen der Blutbewegung,

*) Wer letztere Frage verneint und an das Dasein eigenthümlicher Lebenskräfte glaubt, wird die Zulässigkeit solcher Untersuchungen demohngeachtet einräumen müssen. Wo die Wirksamkeit physischer Kräfte bereits erwiesen ist, kann von einer Gegenwart spezifisch vitaler nicht mehr die Rede sein; man wird also durch Darlegung der ersteren das Feld zu beschränken haben, wo letztere zu suchen sind.

sondern gleichzeitig auch deren Erklärung gegeben. Wer von jener Zeit ab die Lage der Dinge unbefangen prüfte, dem musste sich die Annahme, dass das Herz die Blutbewegung vermittele, vor allen anderen darbieten. In anatomischer Hinsicht hatte man den unmittelbaren Zusammenhang der Arterien und Venen in den sogenannten Capillaren erkannt, man hatte den Einfluss der Klappen auf die Richtung des Blutstroms entdeckt und nachgewiesen, dass die Wandungen der Blutgefässe, vor allen der Schlagadern, einen hohen Grad von Elasticität besitzen. In physiologischer Hinsicht wusste man, dass alle Theile des Gefässsystems mit Blut erfüllt waren, man wusste, dass das Herz sich abwechselnd zusammenzog und ausdehnte, und hatte bemerkt, dass das Blut der Schlagadern, in Uebereinstimmung mit den Pulsen des Herzens, bald schneller, bald langsamer floss. Die Erklärung, welche sich an diese Thatsachen am natürlichsten knüpft, ist folgende. Wenn ein Ventrikel sich zusammenzieht, so presst er sein Blut in die bereits vollen Arterien und versetzt diese in einen Zustand der Ausdehnung und Spannung. Ist die Systole vorüber, so verengern sich die Arterien vermöge ihrer Elasticität und treiben das überschüssige Blut nicht etwa ins Herz zurück, was der Klappen wegen nicht möglich ist, sondern vorwärts in die Capillaren. Das in den Haargefässen befindliche Blut weicht nun dem Andrange des arteriellen Stroms, aber es kann nur weichen, indem es den Inhalt der Venen vor sich herschiebt. Schliesslich entweicht das Venenblut in den Vorhof, durch dessen Zusammenziehung und Entleerung dem Ventrikel ersetzt wird, was er im Acte der Systole an die Arterien abgab. Der linke Ventrikel treibt also das Blut durch die Bahn des grossen Kreislaufs in den rechten Vorhof, und der rechte Ventrikel treibt es durch die Bahn des kleinen Kreislaufs bis in den linken Vorhof; überall fliesst das Blut in Folge eines von hinten wirkenden Drucks.

§ 148. Die erste Schwierigkeit, welche dieser Ansicht entgegen tritt, ist die Pulslosigkeit der Venen. Beruhte alle Blutbe-

wegung auf einem Drucke von hinten, und ginge dieser Druck vom Herzen aus, so müsste allem Anscheine nach der Puls auch in den Venen sich geltend machen. Dies ist in der Regel nicht der Fall, vielmehr reicht der Einfluss desselben gewöhnlich nur bis in die feinsten Arterienzweige, und schon in den Haargefässen fliesst das Blut mit gleichmässiger Schnelligkeit. Mit Bezug auf diese Thatsachen nahm Bichat an, dass die Wirksamkeit des Herzens nur bis an die Grenze der Capillaren reiche.

Schon in einem früheren Abschnitte, über die Wellenbewegung des Wassers in elastischen Schläuchen, sind Thatsachen niedergelegt worden, welche die eben erwähnte Schwierigkeit beseitigen. Ich habe darauf aufmerksam gemacht, dass in einem elastischen Schlauche, durch welchen Wasser fliesst, die Wirkung der Stösse, welche das Fliessen vermitteln, im Verlaufe des Schlauches allmälig abnehme. Wir haben gesehen, dass die Wellen, welche durch das stossweise Eindringen von Wasser in elastische Kanäle erzeugt werden, von der Einflussmündung gegen die Ausflussmündung an Grösse abnehmen, und je länger der Kanal war, um so mehr wurde der Abfluss des Wassers aus der offenen Ausflussmündung ein gleichmässiger. Niemand wird zweifeln, dass es nur eines hinreichend langen Schlauches bedurft hätte, um die Wirkung der Stösse an dessen Ende vollkommen unmerklich zu machen.

Aber nicht blos die Länge eines elastischen Schlauches, sondern jedes Moment, welches die Reibung begünstigt, wirkt bei der Fortpflanzung der Wellen als Hinderniss. Ich modificirte den Apparat, an welchem ich die Gesetze der Wellenbewegung studirt hatte, dadurch, dass ich in der Mitte des elastischen Schlauches ein Hemmniss anbrachte. Ich durchschnitt nämlich denselben und verband die zusammengehörigen Enden wieder, indem ich zwischen beide ein kleines Stück Holzröhre einband, über deren Lumen auf der einen Seite ein Stück feinmaschiger Tüll gespannt war. Das Wasser musste also durch die vielen und engen Oeffnungen dieses Stoffes hindurchdringen, wenn es

aus der ersten Hälfte des elastischen Schlauches in die zweite gelangen sollte.

Wenn nun der Versuch ganz in der früher geschilderten Weise eingeleitet wurde, und wenn also das Wasser stossweise und in einem bestimmten Rhythmus in den elastischen Schlauch eindrang, so zeigte zwar die erste Hälfte desselben ziemlich grosse, dagegen die zweite Hälfte gar keine Wellen; das Wasser floss viel langsamer als in den früheren Versuchen und gleichmässig, ohne alle Andeutung von Stössen, ab.*)

Der Versuch lehrt, dass ein stossweises Fliessen in elastischen Schläuchen durch Anbringung eines hinreichend wirksamen Widerstandsmomentes in ein mehr oder weniger gleichmässiges verwandelt werden könne. Die Anwendbarkeit dieser Erfahrung auf die Blutbewegung wird keines Nachweises bedürfen. In meinem Apparate war die Widerstandsursache an einem einzigen Punkte angebracht, sie wirkte also plötzlich und den gegebenen Bedingungen gemäss sehr mächtig; in den Blutgefässen dagegen sind die Widerstandsursachen zwar ebenfalls sehr wirksam, aber sie treten mit zunehmender Spaltung und Verengerung der Arterienzweige nur sehr allmälig auf. In Folge dieses Unterschiedes wird die Einwirkung der Stösse in meinem elastischen Schlauche plötzlich vernichtet, während die Einwirkung des Pulses im Arteriensysteme nur allmälig verloren geht.

Der Mangel des Pulses in den Haargefässen und Venen beweist also nicht die Unabhängigkeit der Blutbewegung vom Herz-

---

*) Für die Pulslehre kann es von Interesse sein, noch folgender Einzelnheiten zu erwähnen. Nach Anbringung der siebartigen Scheidewand aus Tüll waren die Wellengrössen auch in der ersten Hälfte des Schlauches kleiner, dagegen der Seitendruck (arithmetisches Mittel aus den Höhen- und Tiefenständen der Wellen) grösser als gewöhnlich. Wahrscheinlich ist die Steigerung des Drucks und die dadurch bedingte grössere Spannung der Gefässwandungen die Ursache, von welcher die Abnahme der Wellengrösse abhängt. In dem zweiten Theile des Schlauches, wo die Wellen fehlten, war der Seitendruck äusserst gering, woraus sich ergiebt, dass der Werth desselben unterhalb des Impediments plötzlich abnimmt.

stosse, vielmehr musste, nach den bestehenden Widerstandsverhältnissen im Gefässsysteme, ein allmäliges Verschwinden der Pulswellen in den feinsten Arterienzweigen schon aus physikalischen Gründen erwartet werden.

§ 149. Ein zweiter Einwurf gegen die Abhängigkeit der Blutbewegung vom Herzstosse wurde darauf begründet, dass die Arterien in Leichen sich leer fänden. Wäre das Herz die Ursache des Kreislaufs, sagte man, so müsste die letzte Systole das Arteriensystem mit Blut erfüllen. Man hielt sich demnach berechtigt, die Blutbewegung entweder von der Lebensthätigkeit der Gefässe oder von einer vitalen Selbstbewegung des Blutes abzuleiten. Hierbei übersah man zunächst, dass derartige Kräfte nicht blos eine Entleerung der Arterien, sondern ein Fortbestehen des Kreislaufs nach dem Tode voraussetzen lassen würden.

Anlangend das Thatsächliche, so ist zu bemerken, dass die Arterien nie absolut leer gefunden werden, und dass die relative Leerheit erst ziemlich spät, oft mehrere Stunden nach dem Tode, und unter gewissen Bedingungen gar nicht bemerkt wird. Bei Personen, welche an dyskrasischen Krankheiten oder den Erstickungstod gestorben, bei zu Tode gehetzten Thieren und vom Blitze Erschlagenen sollen die Arterien sich mit Blut erfüllt finden. Letzteres ist von Seiten derer, welche eine Selbstbewegung der lebendigen Säfte annehmen, in der Weise gedeutet worden, dass ein abgestorbenes Blut der Selbstbewegung nicht mehr fähig sei.

Die mitgetheilten Thatsachen erklären sich ungleich einfacher durch die Zusammenziehung der Arterien, durch die Wirkungen der Schwere und durch den Einfluss der Ausdünstung.

Die Arterien befinden sich, wie oben erwiesen wurde, unter sehr viel grösserem Drucke und folglich auch unter sehr viel grösserer Spannung als die Venen. Da nach dem Tode des Herzens die Ursache des ungleichen Drucks aufhört, so kann auch die ungleiche Spannung nicht fortbestehen, die Arterien ziehen sich vermöge ihrer Elasticität so lange zusammen, bis die Span-

nungsdifferenz sich ausgeglichen hat. In Folge dieser Verengerung wird ein beträchtlicher Theil des Arterienblutes in die Venen übergeführt. In der Regel bleibt es aber bei dieser Verengerung nicht, sondern die Arterien ziehen sich in Folge ihrer lebendigen Contractilität noch weiter zusammen und entleeren wiederum einen Theil ihres Inhalts in die Venen, welche in Folge dessen merklich anschwellen. Es versteht sich von selbst, dass diese Verengerung nicht Bestand haben kann, sie verschwindet vielmehr mit dem Eintreten des absoluten Todes der Arterien, welche von nun an sich wieder erweitern. Man bemerke, dass diese Erweiterung aus physischen Gründen nicht ausbleiben kann, denn da die vitale Contractilität die Arterien in höherem Grade verengte, als dies die Elasticität bei Ausgleichung der Spannungsdifferenzen des Arterien- und Venensystems gethan hatte, so muss eben die Elasticität eine abermalige Erweiterung der Arterien herbeiführen.

Dieses wechselnde Spiel der Verengerung und Erweiterung, welches namentlich durch Parrys sorgfältige Messungen erwiesen wurde,*) erklärt bereits die unvollständige Füllung der Arterien nach dem Tode zum grössten Theile. Natürlich kann die Blutmasse, welche die verengten Arterien füllte, nicht ausreichen, die wieder erweiterten zu füllen. Rechnet man hierzu noch die Ausschwitzung von Serum, welche in den letzten Lebensstunden häufig einzutreten pflegt, ferner die nicht unbeträchtliche Ausdünstung der Leichen und endlich das Sinken des Blutes in die tiefer liegenden Theile, so kann es nicht auffallen, dass sich in den Arterien, namentlich der nach oben gewandten Organe, ein merklicher Blutmangel kund giebt.

Man könnte fragen, ob die Erweiterung der Arterien, welche mit dem Tode der Gefässwandungen eintritt, nicht das Blut aus den überfüllten Venen in die Schlagadern zurückziehen müsste. Ich vermuthe, dass dies nur deshalb nicht geschehe, weil die

*) *Parry, additional experiments on the arteries.* London 1819.

Erweiterung erst dann eintritt, wenn das Blut in den Haargefässen geronnen und folglich nicht mehr flüssig ist. Bliebe das Blut flüssig, so wäre eine Entleerung der Arterien nach dem Tode gewiss nicht möglich, und gerade hierauf könnte es beruhen, dass bei gewissen Todesarten die Arterien nicht leer werden. Jedenfalls ist beachtenswerth, dass unter denselben Umständen, wo die Schlagadern der Leichen sich mit Blut erfüllt fanden, auch eine Unfähigkeit des Blutes zum Gerinnen beobachtet wurde.*)

§ 150. Eine besondere Schwierigkeit wollte man in dem Umstande finden, dass Durchschneidung selbst grösserer Arterien nicht unbedingt Verblutung veranlasse. In der That müsste eine *vis a tergo*, wie die des Herzens, das Blut aus den offenen Arterienmündungen austreiben, wenn nicht ein Gerinsel sich bildete und die Oeffnungen verstopfte. Man hat eingewandt, dass, so lange ein Druck von hinten das Blut durch die Arterien triebe, das Zustandekommen eines verstopfenden Gerinsels unmöglich sei, denn dies Gerinsel werde, ehe es fest sei, erst einmal lose sein müssen, und werde dann dem Drucke nicht widerstehen können. Es führt indess zu nichts, die Unmöglichkeit eines Vorganges durch Vernunftschlüsse zu begründen, dessen Existenz durch die Erfahrung auf das Vollständigste erwiesen ist. Dass das arterielle Blut unter einem hohen Drucke stehe, beweist jeder in die Schlagadern eingeführte Manometer, und dass trotz dieses Drucks eine geöffnete Arterie sich durch Gerinsel verstopfe, ist durch physiologische und chirurgische Erfahrungen über Thrombusbildung ebenso entschieden dargethan. Wir brauchen nur an die sogenannten Bluter zu erinnern. Die tödtlichen Blutverluste, welche bei solchen Individuen bisweilen schon in Folge eines

*) Indess lässt sich die Thatsache auch noch auf eine andere Weise erklären. Es kann möglicher Weise Umstände geben, unter welchen die vitale Zusammenziehung der Arterien nach dem Tode des Herzens ausbleibt; in allen solchen Fällen würde mit der Ursache der Entleerung natürlich auch deren Wirkung wegfallen.

Nadelstiches eintreten, sind eben dadurch bedingt, dass die so wichtigen Blutgerinsel sich nicht bilden.*)

§ 151. Auch die Grösse der Widerstände, welche der Blutbewegung entgegen treten, wurde als ein Beweis benutzt, dass der Herzstoss nicht die alleinige Ursache des Kreislaufs sein könnte. Sonderbar genug erlaubte man sich diesen Einwurf gegen die Harveysche Lehre zu einer Zeit, wo man die Grösse des Widerstandes noch gar nicht kannte. Wir haben in einem früheren Abschnitte die Resultate der neueren Messungen mitgetheilt, welche lehren, dass die Kraft der gesammten Widerstände eine sehr mässige ist. In der grossen Mehrzahl der warmblütigen Thiere ist der Druck einer halben Atmosphäre mehr als ausreichend, um die Widerstände zu besiegen, und wir haben keinen Grund zu zweifeln, dass der Herzmuskel einer solchen Leistung gewachsen sei.

Mit Bezug auf diese neueren Erfahrungen könnten wir den oben erwähnten Einwurf auf sich beruhen lassen, wenn es nicht wichtig schiene, die Irrthümer, die hier obwalteten, mit Klarheit als solche nachzuweisen.

Es ist erfahrungsmässig, dass Wasser durch äusserst feine Capillarröhren nicht abfliesst, auch wenn es unter dem Einflusse eines sehr bedeutenden Drucks steht. Man hielt dies für einen Beweis, dass auch das Blut durch die Capillargefässe nicht abfliessen werde. Indess hat Poisseuille nachgewiesen, dass Wasser aus capillaren Glasröhren allerdings ausfliesst, wenn man die Ausflussöffnung des Röhrchens unter Wasser bringt.**) Offen-

*) Ganz beiläufig die Bemerkung, dass der Thrombus kein Kunststück einer spezifischen Lebenskraft, sondern lediglich das Product eines Gerinnungsprozesses ist. Wenn man in eine durchschnittene Arterie eine etwas lange Messingröhre einbindet, so hört der Abfluss des Blutes durch diese sehr bald auf. Wenn man die Ligatur und nach dieser die Röhre entfernt, so springt das Blut wieder aus der Schlagader; es hat sich also der Thrombus zunächst nur in der todten Röhre gebildet, in welcher die Lebenskraft nichts zu schaffen hat.

**) Annalen der Physik und Chemie B. LVIII. S. 425 und *Annales de chym. Ser. III. T. VII.* p. 50.

bar entsprechen die Verhältnisse im Haargefässsysteme dem letzteren Falle, denn da Capillaren und Venen unmittelbar in einander übergehen und beide mit Blut erfüllt sind, so liegen die Ausflussmündungen der ersteren nicht im Trocknen, sondern im Nassen.

Demohngeachtet bleibt richtig, dass ein Röhrchen von der Feinheit eines Capillargefässes der Bewegung des Blutes einen grossen Widerstand entgegen setzen müsse. Auf diese Grundlage scheint man den unberechtigten Schluss gebaut zu haben, dass Millionen von Capillaren einen ganz unüberwindlichen Widerstand veranlassen müssten. Diese Folgerung wäre nur dann begründet, wenn sämmtliche Capillaren hinter einander lägen und einen einzigen Kanal von enormer Länge bildeten. Dies ist indess nicht der Fall, vielmehr bilden die Haargefässe zahllose Collateralbahnen, welche die Kraft des Widerstandes in demselben Grade vermindern, als sie der Zahl nach vermehrt werden. Zur Bestätigung dieses Lehrsatzes sind in einem früheren Abschnitte (§ 41) die nöthigen Versuche vorgelegt worden; hier genüge eine populäre Betrachtung, welche schon Sauvages anstellte. Man denke sich die Capillaren als Ausflussöffnungen der arteriellen Gefässhöhle, so ist klar, dass die Quantität des Abflusses in demselben Masse zunehmen werde, als die Zahl solcher Oeffnungen vermehrt wird. Denn wie gross auch die Kraft der Adhäsion sei, mit welcher eine Capillare das durchfliessende Blut fesselt, immerhin bleibt sicher, dass durch Millionen Capillaren eben Millionen Mal mehr abfliesse als durch eine. Verlangt man also für das Arterienblut einen Abfluss von bestimmter Grösse, so wird zur Production desselben ein um so geringerer Herzdruck genügen, je grösser die Zahl der Haargefässe ist, welche ihn vermittelt.

§ 152. Die Frage, ob die Herzkraft ausreiche, die Widerstände zu besiegen, welche der Blutbewegung entgegen treten, kann nur auf dem Wege der Erfahrung mit Sicherheit entschieden werden. Giebt man das Unleugbare zu, dass das arterielle

Blut unter dem Einflusse der Herzkraft steht, so käme es nur darauf an zu beweisen, dass jede Veränderung des arteriellen Blutdrucks eine proportionale Veränderung des venösen Blutdrucks bedinge, indem hieraus mit Sicherheit gefolgert werden könnte, dass die Kraft, welche das arterielle Blut bewegt, in den Capillaren nicht verbraucht werde, sondern durch diese hindurch bis in die Venen wirke.

Poisseuille hat das Verdienst, diesen Beweis geführt zu haben. *) Er legte bei einem Pferde eine Darmschlinge frei und brachte in eine Vene desselben seinen Hämodynamometer in der Weise an, dass die Spitze des Instrumentes gegen die Capillaren gerichtet war. Das mit Kaliwasser gefüllte Instrument ergab eine Druckhöhe von 330 Millimeter. Als aber eine Arterie der Darmschlinge angestochen wurde, sank der Druck auf 270 Mill., bei Oeffnung einer zweiten Arterie auf 175, bei Oeffnung der dritten auf 70 und nach Verwundung einer vierten auf 30. Wurden hierauf die Arterienwunden durch leises Auflegen einer Fingerspitze geschlossen, ohne das Gefäss zu comprimiren, so stieg die Kaliwassersäule allmälig und erreichte ungefähr wieder die ursprüngliche Höhe.

Um die Beweiskraft dieses Experimentes zu verstehen, muss man erwägen, dass Blut aus Arterienwunden nicht abfliessen kann, ohne die Wirksamkeit einer Kraft, die es austreibt. Genau so viel Kraft, als nothwendig ist, um das Spritzen des Blutes aus der Wunde zu vermitteln, genau so viel geht verloren für das Blut, welches in dem verwundeten Gefässe nach den Capillaren strömt. Mit jeder neuen Wunde, welche spritzte, entstand also eine Verminderung des Herzdrucks, aber mit jeder neuen Wunde sank auch das Wasser im Hämodromometer. Unter diesen Umständen bleibt kein Zweifel übrig, dass der venöse Blutstrom nicht minder als der arterielle unter dem Einflusse des Herzdrucks stehe.

---

*) Müllers Archiv 1834. pag. 365.

So schätzbar die Versuche Poisseuilles sind, so bestätigen sie doch nur manche ältere Beobachtungen, welche dasselbe lehren. Schon Haller und Spallanzani hatten darauf hingewiesen, dass in den ersten Tagen der Bebrütung nicht nur in den Arterien, sondern auch in den Venen des Hühnchens der Pulsschlag bemerklich sei. Dieselben bemerkten, dass bei erwachsenen, aber geschwächten Thieren sehr häufig dasselbe Phänomen eintrete. Nach meinen Erfahrungen steht es so ziemlich in der Hand des Beobachters, jene interessante Erscheinung hervorzurufen; es ist nämlich in der Regel nur nöthig, beträchtliche Blutentziehungen vorzunehmen. Bei Fröschen kann man die Untersuchung dadurch einleiten, dass man mit einem Stilet Hirn und Rückenmark zerstört, ein Verfahren, welches den doppelten Vortheil gewährt, dem Thiere unnütze Qualen zu ersparen und ein Präparat zu liefern, welches unbeweglich unter dem Mikroskope liegt. In den günstigsten Fällen der Art ruht das Blut während der Diastole vollkommen und rückt nur während der Systole vorwärts, und zwar nicht blos in den Arterien, sondern auch in den Haargefässen und Venen.

Bemerkenswerth ist, dass gerade bei sehr geschwächten Kräften Erscheinungen eintreten, welche beweisen, dass die Wirkung des Herzstosses sich über das gesammte Gefässsystem erstrecke. Es versteht sich von selbst, dass das Herz im Besitze seiner vollen Kraft nicht weniger leisten könne als in der Periode der grössten Schwäche, fraglich kann nur sein, weshalb sein Einfluss auf die Bewegung des Venenblutes im erwachsenen und kräftigen Thiere verborgen bleibe und nur in Embryonen und sehr geschwächten Individuen zum Vorschein komme.

Meines Erachtens erklärt sich Letzteres durch den Mangel der Spannungsdifferenz zwischen Arterien und Venen. Wo eine solche besteht, wie im erwachsenen und kräftigen Thiere, da wirken die Arterien auch während der Diastole des Herzens mit einer Druckkraft, welche der gleich kommt, durch welche ihre elastischen Wandungen im Momente der Systole expandirt wur-

den. Zur Hervorbringung einer überwiegenden Spannung in den Arterien gehören aber zwei Bedingungen: erstens eine genügende Blutmenge und zweitens eine solche Beschleunigung des Pulses, dass jeder zweite Herzschlag dem ersten folgt, noch ehe alles Blut, was dieser den Arterien überlieferte, durch die Capillaren abgeflossen ist. In den Embryonen und in den sehr geschwächten Thieren finden diese Bedingungen nicht statt, und indem bei ihnen das Arteriensystem nur während der Systole gespannt ist, kann es während der Diastole nicht wirksam sein.

§ 153. Bei den weit verbreiteten Zweifeln, ob die Herzkraft den Widerständen der Capillären gewachsen sei, mussten neue Bedenken entstehen, wenn man berücksichtigte, dass der in den Haargefässen schon geschwächte Blutstrom noch ein zweites Gefässnetz im Systeme der Pfortader vor sich habe. Und doch ist diese Schwierigkeit noch nicht die grösste, denn bei den Fischen, deren Herz viel kleiner ist als das der Säugethiere, hat das Blut sogar die Hemmnisse dreier Capillarnetze zu überwinden. Unstreitig haben diese anatomischen Einrichtungen sehr viel zu dem Misstrauen beigetragen, mit welchem die Mehrzahl der Aerzte jede mechanische Erklärung der Blutbewegung aufzunehmen pflegte. Man bemerke in diesem Bezuge Folgendes:

1) Die Vervielfältigung der Haargefässsysteme ist kein directer Beweis für die Vermehrung der Widerstände, welche der Blutbewegung entgegen stehen, denn das Mass des Widerstandes hängt nicht blos von der Zahl jener, sondern überdies und vornehmlich von ihrer Organisation ab.

2) Da das Herz, auch nachdem es ausserordentlich geschwächt worden ist, Kraft genug besitzt, das Blut durch die Haargefässe des Körpers hindurch zu treiben (wie die pulsirende Bewegung des Venenblutes in sterbenden Thieren beweist), so darf man dem Herzen in normalen Verhältnissen wohl Kraft genug zutrauen, das Blut auch durch mehrere Haargefässe hindurch zu treiben.

3) Vervielfältigung der Haargefässsysteme wird, bevor sie

den Blutlauf gänzlich verhindert, zunächst die Circulation verlangsamen müssen. Nun geschieht aber bei Säugethieren trotz der Hindernisse der Capillaren die Circulation so überaus rasch, dass von dem Auftreten eines neuen Capillarsystems in den Fischen mehr nicht als eine gewisse Verlangsamung des Kreislaufs zu erwarten steht.

Dass die Herzkraft ausreiche, das Blut wenigstens durch zwei Haargefässe hindurch zu treiben, sah ich in Versuchen an Fischen auf das Bestimmteste. Man durchstosse bei kleineren Individuen die Schädelknochen mit einem Stilet und zerstöre Gehirn und verlängertes Mark. Durch diese Operation wird der Kreislauf nicht auffallend verändert, aber die willkürlichen Bewegungen werden vernichtet, was für den Verlauf der Beobachtung vortheilhaft ist. Nach Zerstörung des Gehirns lege man das Herz und den sogenannten *bulbus aortae* frei und bringe die Schwanzflosse unter das Mikroskop, um den Kreislauf zu beobachten. Da das Blut in den Schwanzvenen bereits zwei Haargefässnetze passirt hat, so handelt es sich darum zu erfahren, ob seine Bewegung unter dem Einflusse der Herzkraft stehe. Man lässt also, während man die Circulation unter dem Mikroskope beobachtet, durch einen Assistenten den *bulbus aortae* abwechselnd mit einer Pincette comprimiren und überzeugt sich dann leicht, dass auch hier die Bewegung vom Herzen abhänge. Jeder Druck auf den *bulbus aortae* hemmt die Blutbewegung in den Schwanzvenen bald mehr, bald weniger.

§ 154. Die oben mitgetheilten Erfahrungen haben von einer gewissen Seite etwas Befremdliches. Konnten wir auch denen nicht beistimmen, welche die Adhäsion in den Haargefässen für so bedeutend hielten, dass sie die Wirksamkeit des Herzdrucks vollkommen aufhöbe, so durften wir doch nicht leugnen, dass diese Adhäsion ein sehr erhebliches Hemmniss sei. Gegenwärtig findet sich nun, dass auch ein Minimum von Herzkraft zur Besiegung dieser Hindernisse genug sei.

Die Auflösung dieses scheinbaren Widerspruchs liegt in der

stossweisen Bewegung des Herzens. Ein Stoss wirkt anders als ein stetiger Druck, und was das Herz im Zustande höchster Schwäche durch stetigen Druck wahrscheinlich nicht würde leisten können, das leistet es dennoch vermittelst der stossweisen Bewegung oder des Pulses. Wenn nur dem Herzen so viel Kraft übrig bleibt, als nöthig ist, um seinen Inhalt auszutreiben und hiermit den Anfang des Arteriensystems in eine etwas grössere Spannung zu versetzen, als die ist, welche ein mehr peripherischer Abschnitt desselben Systems besitzt, so sind die genügenden Bedingungen zur Bewegung schon gegeben. Es ist nämlich eine positive Welle gegeben, welche durch das ganze System hinrollt und die überschüssige Blutmasse mit fortreisst, der sie ihr Dasein verdankt. In einem früheren Abschnitte ist bereits gezeigt worden, wie diese Wellenbewegung das Fliessen vermittele (§ 61); hier ist nur hervorzuheben, wie bei einer derartigen Bewegung der Einfluss der Widerstände sich ändert. Wenn ein Fluidum unter der Einwirkung eines stetigen Drucks durch eine Röhre fliesst, so hat dieser Druck in jedem Zeitmomente die ganze Summe von Widerständen zu überwinden, welche im Verlauf der Röhre sich irgendwo darbieten. Wenn dagegen das Fluidum stossweise in eine elastische Röhre getrieben wird, so hat der Stoss nicht gleichzeitig die Summe der sämmtlichen Widerstände, sondern nur den Widerstand des Abschnitts zu überwinden, welchen er ausdehnt. Die ausgedehnte Stelle zieht sich dann vermöge ihrer Elasticität zusammen und überwindet den Widerstand des zweiten Abschnitts u. s. w., woraus sich ergiebt, dass der Stoss die Widerstandsmomente im Einzelnen angreift und in der Zeitfolge zu überwinden weiss.*)

§ 155. Aus dem Vorhergehenden ergiebt sich, dass die Herzkammern die Function einer Druckpumpe haben. Eine Frage, welche sich hieran naturgemäss anschliesst, ist die, ob die Vor-

*) Der Erste, welcher auf diese wichtigen Verhältnisse aufmerksam machte, war E. H. Weber in seinen *Adnotationes anatom. et physiol. de pulsu etc.*

höfe als Saugpumpe wirken. Man könnte sich nämlich vorstellen, dass die Atrien, indem sie sich ausdehnten, einen leeren Raum bildeten, welcher eine Aspiration auf das Venenblut ausübte. In dieser Weise hat Zugenbühler die Sache aufgefasst, welcher sogar der Ansicht ist, dass die Bewegung des Venenblutes ausschliesslich durch Ansaugung zu Stande komme. *)

Untersucht man die physikalischen Bedingungen, unter welchen eine derartige Aufsaugung zu Stande kommt, so überzeugt man sich bald, dass ihr Einfluss überaus unbedeutend sein müsse. Es kann nämlich die Kraft der Aufsaugung nicht grösser sein als die Expansivkraft der Vorhöfe, und diese ist jedenfalls sehr geringfügig. Die Muskeln haben an der Ausdehnung der Atrien bestimmt keinen Theil, und die Kraft der Elasticität, welche die verengten Höhlen auf ihr ursprüngliches Mass zurückführt, kann nach der physischen Beschaffenheit der Vorhöfe sehr wenig in Betracht kommen. Man muss sich nur hüten, die Diastole der Vorhöfe, die sich bei geöffnetem Brustkasten dem Auge darstellt, als reine Wirkung der Expansionskraft zu betrachten, vielmehr ist die Vergrösserung, welche die Atrien im Momente der Diastole zeigen, bei Weitem zum grösseren Theile eine passive, nämlich durch den Andrang des Venenblutes vermittelte. Hiervon kann man sich leicht überzeugen, wenn man die obere Hohlvene kurz vor ihrem Eintritte ins Atrium abschneidet. Mit dieser Operation vermindert sich die Grösse der Diastole augenblicklich um ein Auffallendes, offenbar deshalb, weil nun das Blut durch die Wunde abfliesst und eine Spannung des Vorhofs unmöglich wird.

Auch die Beobachtungen und Versuche sprechen wenig für eine active Aspiration, ein Ausdruck, dessen Bedeutung sich aus dem Nächstfolgenden ergeben wird. Wenn man, sagt Wedemeyer, die Brusthöhle warmblütiger Thiere öffnet und das Herz frei legt, während die Blutcirculation noch vor sich geht, so

* Vergl. Carus in Meckels Archiv IV. S. 413.

sieht man deutlich die grossen Hohladern während der Diastole des Vorhofs einsinken und das Blut sie rascher durchströmen, während dasselbe zurückprallt und die Venen anschwellt, sobald der Vorhof sich zusammenzieht.*) Dieser Versuch beweist aber nur so viel, dass der venöse Blutstrom in dem Momente, wo ihm die Bewegung gestattet wird, schneller fliesst als in dem Momente, wo die Bewegung verhindert wird. Der contrahirte Vorhof kann als eine Ligatur der Vene betrachtet werden; natürlich wird nun die Vene, so lange die Ligatur dauert, anschwellen und nach Beseitigung derselben rasch zusammenfallen.

Der Versuch beweist also keine active Aspiration, d. h. kein Auftreten einer neuen Kraft, durch welche der Blutumlauf im Ganzen gefördert würde. Erwiesen ist zwar, dass die Blutbewegung in den Venen während der Diastole der Vorhöfe eine Beschleunigung erfahre, aber diese Beschleunigung ist theils nur eine relative, da ja bei contrahirtem Vorhofe der Blutlauf in den Hohlvenen vollkommen gehemmt war, und anderen Theils erklärt sie sich durch die vermehrte Spannung der Gefässe, welche eben durch den gehinderten Abfluss des Blutes, ja sogar durch einen Rückfluss desselben bedingt wurde, und welche in letzter Potenz immer wieder von der *vis a tergo* abhängt. Magendies Ausspruch: »*Le sang est attiré vers le coeur par sa dilatation*« hätte auf Erscheinungen, wie die vorher beschriebenen, nicht begründet werden sollen.

Auch Poisseuilles Versuche mit Hülfe des Hämodynamometers kann ich nicht für beweisend erachten.**) Der französische Physiker füllte sein Instrument mit Kaliwasser und führte es in das centrale Ende der durchschnittenen *vena jugularis* so tief ein, dass die Einflussmündung in die Hohlvene ganz nahe am Vorhofe zu liegen kam. Dies ermöglichte er dadurch, dass er

*) G. Wedemeyer, Untersuchungen über den Kreislauf des Blutes. Hannover 1828.

**) *Magendie, Journal de physiologie,* 1830. pag. 294.

an das Mundstück seines Instrumentes einen elastischen Katheter befestigte. Offenbar diente der Apparat in diesem Falle als reiner Druckmesser und bestimmte den Werth w in der oberen Hohlvene. Noch ist zu bemerken, dass der Brustkasten des Hundes eröffnet und die Respiration künstlich unterhalten wurde.

Die Kalilösung schwankte zwischen + 55 und + 65 Millim., und zwar entsprach die Höhe + 65 der Systole des Vorhofs, der geringere Druck + 55 dagegen der Diastole. Hieraus soll sich nun ergeben, dass die Kraft der Aspiration dem Drucke einer Kalilösung von 10 Mill. gleichkomme. Aber der Versuch sagt mehr nicht, als dass der Widerstand während der Diastole geringer war als während der Systole, ein Resultat, welches sich einfach dadurch erklärt, dass der Vorhof, wenn er sich zusammenzieht, einen Theil seines Inhalts gewaltsam in die nächsten Venen treibt.

Ich kenne nur einen Versuch, welcher die Aspiration des Venenblutes durch den rechten Vorhof beweisen würde, wenn sich bei Wiederholung desselben die Richtigkeit der Beobachtung bestätigen sollte. Wedemeyer legte bei einem stehenden Pferde die Jugularvene bloss und führte in das centrale Ende derselben einen elastischen Katheter ein, mit dessen äusserem Ende eine gebogene Glasröhre verbunden war.*) Der absteigende Schenkel der letzteren, welcher eine Länge von 2 Fuss hatte, wurde in ein Glas mit gefärbtem Wasser gehalten, und nun stieg angeblich bei jeder Diastole des Herzens das Wasser in der Röhre um 2 und mehrere Zoll empor, während es bei jeder Systole um ebenso viel zurücksank. Wedemeyer versichert, sich auf das Bestimmteste überzeugt zu haben, dass diese Aspiration wirklich mit der Diastole des Herzens und nicht mit dem Acte des Einathmens zusammenfiel. Auf die Begründung dieses Punktes würde Alles ankommen, da, wie später zu zeigen, die Inspiration wirklich mit einer Ansaugung des Venenblutes verbunden

*) A. a. O. S. 309.

ist. Vor der Hand möchte der vereinzelte Versuch wohl um so weniger beweisen können, als er mit dem von Poisseuille erhaltenen Resultate in Widerspruch steht. Poisseuille erhielt auch während der Diastole des Vorhofs einen positiven Druck, + 55 Mill., Wedemeyer erhielt einen ungefähr ebenso grossen negativen.

Man bemerke übrigens, dass, selbst wenn Wedemeyers Erfahrung sich bestätigen sollte, die Wirkung der Aspiration sich als sehr unbedeutend herausstellen würde. Bei dem Pferde entspricht der durch die Widerstände bedingte Druck einer Höhe von 9 Fuss Wasser; demnach würde eine Aspiration von 2—3 Zoll zur Ueberwindung des Widerstandes nur wenig beitragen.

§ 156. Bis vor Kurzem waren viele Physiologen geneigt zu glauben, dass der Blutlauf durch die lebendigen Kräfte der Gefässe wesentlich unterstützt werde, gegenwärtig dürfte diese Ansicht nur wenige Anhänger haben. Zwar besitzen die Wandungen der Blutgefässe in mehr oder weniger hohem Grade das Vermögen sich zusammen zu ziehen, allein diese Bewegungen geschehen überaus langsam, und die Verengerung der Gefässhöhle, welche sie herbeiführen, ist eine anhaltende. Derartige Contractionen bieten der Blutbewegung keine Vortheile. An eine Unterstützung des Kreislaufs durch die Bewegungen der Blutgefässe konnte man nur so lange glauben, als man das Pulsiren der Arterien für eine Wirkung der lebendigen Contractilität hielt. Bei den Würmern ist das Pulsiren der grossen Gefässstämme allerdings ein selbstständiges, bei den Wirbelthieren dagegen ist es nur Folge des Herzstosses. Nun ist zwar unleugbar, dass die elastische Contraction der pulsirenden Arterien das Blut fortschiebe, aber ebenso einleuchtend ist, dass dieser Zusammenziehung eine Ausdehnung vorausgehen müsse, die ihrerseits wieder von dem Andrange des Blutstroms abhängt. Offenbar wird die Kraft der Contraction der Kraft der Expansion gleich sein müssen, und folglich kann der Blutstrom bei jener nicht mehr gewinnen, als er bei dieser, die er zu bewirken hat, an Kraft zusetzt,

Ich habe in einem früheren Paragraphen (§ 122) nach dem Vorgange Webers gezeigt, wie die Elasticität der Arterienwandungen und die mit ihr zusammenhängende Wellenbewegung den Kreislauf unterstütze. Dies darf nicht so verstanden werden, als ob die Herzkraft dieser Unterstützung bedürfe und für sich allein zur Gewältigung der Widerstände nicht ausreiche. Hales befestigte eine Metallröhre in den Gekrösarterien eines todten Hundes, richtete die Röhre lothrecht und füllte sie mit einer gefärbten und flüssigen Harzmasse. Dabei fand sich, dass ein Druck von $4\frac{1}{2}$ bis $5\frac{1}{2}$ Fuss Höhe ausreichte, die Haargefässe und Venen zu füllen.*) Dies beweist, dass auch ein stetiger Druck, welcher geringer ist als der des Herzens, hinreicht, die Widerstände zu besiegen; ein Resultat, welches sehr gut zu der ärztlichen Erfahrung stimmt, dass auch bei weitreichenden Verknöcherungen des Arteriensystems der Kreislauf bestehen könne.

Der Versuch von Hales beweist aber nicht nur die Entbehrlichkeit der Wellenbewegung, sondern auch die Entbehrlichkeit aller von den Gefässen abhängigen Lebenskräfte, inwiefern solchen ein bewegendes Moment beim Blutumlaufe zugeschrieben wurde. Wenn dem Versuche zu Folge eine statische Kraft, welche der des Herzens noch nicht gleichkommt, eine Injectionsmasse durch die Haargefässe todter Theile treibt, so kann die Mitwirkung der Capillaren beim Umtriebe des Blutes keine unbedingt nothwendige sein.

Mit diesem Ergebniss noch nicht zufrieden, suchte Poisseuille zu beweisen, dass die Annahme eines Einflusses der Haargefässe auf die Blutbewegung überhaupt unzulässig sei. Seine Beweisführung beruht auf einem schon früher erörterten Versuche (§ 120). Wenn man den Hämodynamometer in eine Gekrösvene einführt, so sinkt das Quecksilber, wenn man durch Oeffnung einer Gekrösarterie den arteriellen Blutstrom schwächt. Das Quecksilber sinkt aber proportional dieser Abschwächung, und es findet

*) A. a. O. S. 151.

sich, wenn man durch grössere Einschnitte in zahlreiche Schlagadern den arteriellen Blutdruck auf eine sehr geringe Höhe zurückführt, dass auch die Kraft des venösen Blutstroms nahezu auf Null sinkt. Poisseuille behauptet nun mit Recht, dass, wenn die Haargefässe eine selbstständige Kraft der Bewegung besässen, ein anderes Resultat zu erwarten stände. Da nämlich die Schlagadern trotz der zahlreichen Einschnitte immer noch den Capillaren Blut zuführen, so hätten diese das Quecksilber des Druckmessers auf einer gewissen Höhe erhalten müssen, wenn sie mit Propulsionskraft überhaupt begabt wären.

Allerdings scheinen die Physiologen, welche eine Mitwirkung der Capillaren beim Kreislaufe für nöthig hielten, weniger auf eine Kraft der Propulsion als Attraction gerechnet zu haben, und Poisseuilles Versuch widerlegt nur jene, nicht diese. Indess bedarf auch die Attractionstheorie am wenigsten einer Widerlegung, da eine Anziehungskraft der Haargefässe, selbst wenn sie bestände, der Blutbewegung nichts nützen könnte. Man übersah, dass eine Kraft, welche das Blut anzöge, unfehlbar das angezogene auch halten würde. Die Folge hiervon konnte nur ein Aufhören der Strömung sein.

§ 157. Der kühnste Versuch, die Blutbewegung durch die Thätigkeit einer Attractionskraft zu erklären, ist neuerlich von König gemacht worden.*) Nach seiner Ansicht soll die Bewegung des Blutes durch eine Centralkraft regulirt werden, welche von der Stelle ausgehe, wo das Herz liege. Um diesen Centralpunkt soll sich das Blut in einer Ellipse bewegen, deren Perihel in den Capillaren der Lungen und deren Aphel in den Haargefässen des Körpers liege, und endlich soll die Centralkraft, welche den Umlauf normirt, sich umgekehrt verhalten wie die Quadrate der Entfernungen.

König macht also die Bewegung des Blutes von denselben Gesetzen abhängig, welche nach Keplers und Newtons Entdeckun-

*) Der Kreislauf des Blutes und die Planetenbahnen, ein physiol.-mathem. Versuch von Dr. König. Weissensee 1844.

gen den Umlauf der Planeten um die Sonne bestimmen, und sucht durch ausführliche Rechnungen die Brauchbarkeit dieser Hypothese nachzuweisen.

Fragt man, wie König auf einen so sonderbaren Gedanken gekommen, so ergiebt sich aus S. 9 der erwähnten Schrift Folgendes. Rameau fand, dass sich die Pulsfrequenz annäherungsweise umgekehrt wie die Wurzeln der Körperlängen verhalte, d. h. wenn die Pulszahlen mit $p\ p'$ und die Körperlängen mit $a\ a'$ bezeichnet werden,

$$p\ :\ p' = \sqrt{a'}\ :\ \sqrt{a}$$

Nun wird angenommen, die Geschwindigkeit der Blutbewegung, c, entspreche der Häufigkeit des Pulses, p, in welchem Falle auch

$$c\ :\ c' = \sqrt{a'}\ :\ \sqrt{a}$$

sein würde. Es hiess dann weiter: »Der Raum, welchen das Blut während der Zeit eines ganzen Umlaufs zurücklegt, ist gleich der Peripherie des Kreises, dessen Durchmesser die Körperlänge ist. Da nun die Geschwindigkeiten gleich sind den Räumen, dividirt durch die Zeiten, so kann man, wenn $t\ t'$ die Umlaufszeiten bezeichnen, für $c\ c'$ substituiren $\frac{a\pi}{t}$ und $\frac{a'\pi}{t'}$ und die erwähnte Proportion in folgende verwandeln: $\frac{a\pi}{t} : \frac{a'\pi}{t'} = \sqrt{a'} : \sqrt{a}$; ins Quadrat erhoben: $\frac{a^2}{t^2} : \frac{a'^2}{t'^2} = a' : a$, woraus $\frac{a^3}{t^2} = \frac{a'^3}{t'^2}$ oder $t'^2 a^3 = t^2 a'^3$ oder

$$t'^2 : t^2 = a^3 : a'^3$$

d. h. das Keplersche Gesetz: Die Quadrate der Umlaufszeiten verhalten sich wie die Würfel der mittleren Entfernung.

Diese Folgerung ist nun schon darum unberechtigt, weil die Geschwindigkeit des Kreislaufs der Häufigkeit des Pulses nicht entspricht und folglich die Substitution c für p durchaus unzulässig ist (vergl. § 86 etc.).

Im Allgemeinen muss gegen den Versuch von König eingeworfen werden, dass ein und dasselbe Naturgesetz nur auf we-

sentlich gleichartige Bedingungen bezogen werden könne, und dass die Verhältnisse, unter welchen das Gravitationsgesetz eine Bewegung regulirt, mit denen, unter welchen das Blut strömt, überhaupt gar keinen Vergleich zulassen.

Als wesentliche Bedingungen für die Anwendbarkeit der Kepler–Newtonschen Gesetze gelten folgende: 1) Der sich bewegende Körper muss sich im leeren Raume befinden.*) 2) Die Centripetalkraft geht aus von der Masse eines Körpers, welcher durch Attraction wirkt. 3) Es ist die Gegenwart zweier räumlich getrennter Körper erforderlich. Alle diese Bedingungen finden bei der Blutbewegung nicht statt. — Aber ebenso wenig sind die Vorgänge der Bewegung vergleichbar.

Wo eine Centripetalkraft wirkt, da bewegt sich der Körper in der Form einer Ellipse um den im Brennpunkte gelegenen Körper, von welchem die Attraction ausgeht. Nun sprechen wir zwar von einem Kreislaufe, inwiefern das Blut zu dem Punkte zurückkehrt, von welchem es ausgeht, aber dieser Ausdruck ist eben mehr nicht als ein bildlicher. Von einer Ellipse, welche, wie die Keplerschen Gesetze fordern, der mathematischen Construction dieser Figur entspräche, kann nicht im Entferntesten die Rede sein; mit weit grösserem Rechte könnte man sagen, das Blut irre durch die verzweigte Gefässhöhle wie durch die Poren eines Schwammes.

Zweitens liegt es im Wesen der Keplerschen Gesetze, dass der kreisende Körper denjenigen, von welchem die Attraction ausgeht, nie berührt, das Blut aber fliesst durch das Herz, in welchem vorgeblich die Centralkraft liegen soll.

Drittens endlich verhalten sich nach Kepler die Sectoren oder Flächenräume wie die Zeiten, in welchen sie durchlaufen werden, womit zusammenhängt, dass der kreisende Planet in

*) Aus dem Gravitationsgesetz widerlegte Newton die Wirbelmaterie, mit welcher *Descartes* das Weltall erfüllt hatte. Die Bahn, welche die Planeten beschreiben, würde unmöglich sein, wenn diese in ihrem Laufe irgend einen Widerstand fänden.

der Sonnennähe (Perihel) am schnellsten und in der Sonnenferne (Aphel) am langsamsten läuft, desgleichen dass die Bewegung eben an einem Punkte am schnellsten, wiederum an einem am langsamsten ist, während zwischen beiden ununterbrochene Uebergänge vom Schnellen zum Langsamen und vom Langsamen zum Schnellen stattfinden.

Bei dem sogenannten Kreislaufe des Blutes findet dies nicht statt. Beginnen wir die Betrachtung von der Aorte, so findet hier eine sehr rasche Bewegung statt. Diese wird nun gegen die Haargefässe immer langsamer und von dieser aus gegen die grösseren Körpervenen wieder schneller, bis sie in den Hauptstämmen der letzteren annäherungsweise wieder die Geschwindigkeit gewinnt, welche sie in der Aorte anfänglich hatte. Hierauf wird die Blutbewegung im rechten Herzen während der Diastole unterbrochen. In dem Stamme der Lungenarterie ist die Geschwindigkeit wieder ungefähr ebenso gross wie die in der Aorte (nämlich genau ebenso schnell, wenn beide Arterienstämme gleiche Durchmesser haben) und nimmt, wie unter Anderen Spallanzani zeigte, gegen die Capillaren der Lunge nach und nach ab. Von hieraus wächst die Schnelligkeit der Blutbewegung abermals, erreicht zum vierten Male ein Maximum in den Stämmen der Lungenvenen und wird im linken Herzen während der Diastole desselben nochmals unterbrochen. Im sogenannten Kreislaufe kommen also 4 Punkte vor, wo das Blut am schnellsten läuft, zwei, wo es sich am langsamsten bewegt, und zwei, wo der Kreislauf momentan unterbrochen wird. Statt dessen nimmt König an, es bestehe ein Punkt, wo es sich am schnellsten bewege, nämlich in den Capillaren der Lungen, ein zweiter, wo es sich am langsamsten bewege, in den Capillaren des übrigen Körpers, und zwischen beiden fänden die erforderlichen Uebergänge statt.

Gesetzt aber, die Veränderungen der Geschwindigkeit im Verlaufe der Blutbahn erfolgten wirklich nach dem Gesetze, welches König fälschlich annimmt, so könnte die Bewegung demohn-

geachtet nicht von einer Centralkraft abgeleitet werden, sondern würde lediglich von den Weiten der Gefässhöhle abhängen, welche zu den bezüglichen Sectoren der angeblichen Ellipse gehörten. Sollten die Geschwindigkeiten sich so verhalten, wie König annimmt, so müsste die Gefässbahn in den Capillaren der Lungen am engsten und in den Haargefässen des Körpers am weitesten sein; ferner müsste sich die Gefässhöhle von den ersteren gegen die letzteren stetig erweitern und umgekehrt von diesen gegen jene stetig verengern. Nehmen wir dies an, wie König im Widerspruch mit der Erfahrung wirklich annimmt, so wäre die Annahme einer Centripetalkraft vollkommen überflüssig und schon aus diesem Grunde verwerflich.

Ich habe schon bei einer früheren Gelegenheit gezeigt, wie die Physiologie bei einer unbedachten Anwendung der Mathematik leicht rückwärts statt vorwärts komme. Der vorliegende Fall dürfte ein neuer Beweis für die Richtigkeit dieser Bemerkung sein und ist nur aus diesem Grunde so ausführlich behandelt worden.

§ 158. Einen unverkennbaren Einfluss auf den Blutlauf haben die Bewegungen des Körpers, sowohl die willkürlichen als die automatischen des Athmens.

Wenn man den Blutdruckmesser, gleichviel ob in Arterien oder Venen, angebracht hat, so sieht man, dass bei angestrengten Bewegungen die Quecksilbersäule emporsteigt, bisweilen und namentlich in den Arterien um ein Bedeutendes. Natürlich muss diese Vermehrung des Drucks eine Beschleunigung des Blutlaufs bewirken, eine Folgerung, welche durch directe Beobachtungen vollkommen bestätigt wird. Bindet man einen Frosch in geeigneter Weise auf ein Brettchen, um die Blutbewegung in durchsichtigen Theilen zu beobachten, so sieht man, dass bei jeder Anstrengung, welche das Thier macht, um sich zu befreien, die Strömung des Blutes schneller wird.

Die Ursache dieser Beschleunigung dürfte eine doppelte sein. Die wichtigere ist der Druck, welchen die durch heftige Bewegungen verschobenen Eingeweide auf die grösseren Gefäss-

stämme ausüben; eine zweite, zwar minder wirksame, aber doch nicht zu vernachlässigende Ursache liegt in der erhöhten Energie des Herzens, welche sich an kräftige Muskelbewegungen synergisch anschliesst. Wir werden später Gelegenheit nehmen, das Zusammenfallen vermehrter Herzthätigkeit mit Anstrengung der Muskeln durch Erfahrungen nachzuweisen.

Sehr einfache mechanische Betrachtungen lassen keinen Zweifel übrig, dass der Kreislauf des Blutes unter dem Einflusse der Athembewegungen stehen müsse. Bei jeder Inspiration erweitert sich der Brustkasten und veranlasst durch Aspiration einen Zudrang der gasförmigen und tropfbaren Flüssigkeiten, welche durch Bronchien und Blutgefässe zu seiner Höhle Zugang haben. Man darf annehmen, dass nicht nur die in der Brusthöhle befindlichen grossen Arterien und Venenstämme, sondern selbst die Vorhöfe durch aspirirtes Blut erweitert werden. Beim Ausathmen sinkt der Thorax zunächst in Folge seiner Elasticität zusammen und wird bei kräftigen Exspirationen durch die Thätigkeit der Muskeln noch stärker zusammengedrückt; demnach werden die im vorhergehenden Acte erweiterten Räume verengt, und die in ihnen enthaltenen Fluida werden wieder aus der Brusthöhle entfernt.

Wir wollen, ehe wir diese Behauptungen mit den vorliegenden Erfahrungen vergleichen, die theoretische Betrachtung fortsetzen und fragen, welchen Einfluss derartige Verhältnisse auf den Blutlauf ausüben müssen. Eine sehr verbreitete Ansicht ist die, dass die Athembewegungen einen wesentlichen Einfluss auf die Blutbewegung und zwar zu deren Gunsten ausüben; es scheint mir, dass diese Annahme einer gewissen Beschränkung bedürfe.

Anlangend den grossen Kreislauf, so wird bei der Ausathmung ein Druck auf die Arterienstämme ausgeübt, welcher den Inhalt derselben in peripherischer Richtung zu entweichen nöthigt, und welcher demnach den Kreislauf begünstigt. Die Inspiration dagegen wird die Gefässe um ebenso viel erweitern müssen, als die Exspiration sie verengerte; sie wird demnach durch Aspiration

ebenso viel Blut in die Arterien der Brusthöhle zurückziehen, als die Ausathmung durch Propulsion fortschob. Im günstigsten Falle könnte die Exspiration einen Druck auf den linken Ventrikel ausüben, in Folge dessen etwas mehr Blut entleert würde, als durch die Kraft der Systole allein entleert werden könnte; dieses Blut würde dann bei der Aspiration nicht wieder ins Herz zurücktreten, weil die halbmondförmigen Klappen den Rücktritt hindern, und somit würde die Wirkung der Propulsion etwas grösser sein als die der Aspiration. Findet eine derartige Differenz überhaupt statt, so ist sie gewiss sehr unbedeutend.

Gehen wir zu den Venen des grossen Kreislaufs über, so wird die Einathmung eine Aspiration veranlassen, welche das Blut derjenigen Adern, welche in der Nähe des Brustkastens befindlich sind, mit beschleunigter Strömung in die Enden der Hohlvenen und in den rechten Vorhof führt. Hierin liegt eine Begünstigung des Kreislaufs. Nach den gewöhnlichen Annahmen soll nun auch die Ausathmung den Blutlauf in den Venen unterstützen. So behauptet Poisseuille, die Verengerung des Brustkastens comprimire die Venen, und da ein Rücktritt des Blutes der Klappen wegen unmöglich sei, so erfolge eine Entleerung in den rechten Vorhof. *) Aber gerade diese Entleerung scheint mir noch zweifelhaft. Offenbar befindet sich der Vorhof unter demselben Drucke als die Venen und setzt also der Ausdehnung eine Kraft des Widerstandes entgegen, welche der gleich ist, welche die Venen zu comprimiren trachtet. Demnach ist nicht abzusehen, wie der Druck auf die Venen den Vorhof erweitern könnte, und geschieht diese Erweiterung nicht, so fehlt es dem Venenblute an einem Abflusse.

Es kann sogar zweifelhaft scheinen, ob selbst die Inspiration den Rückfluss begünstige. Wenn man die *vena jugularis* in der Nähe des Brustkastens frei legt, so sieht man, dass sie bei jeder Inspiration in dem Grade zusammenfällt, dass ihre Wandungen

*) *Magendie, Journal de physiologie X.* p. 285.

sich an einander legen und die Gefässhöhle verschliessen.*) Unter diesen Verhältnissen kann nur der Theil des Blutes aspirirt werden, welcher zwischen dieser Stelle und dem Herzen befindlich ist; dagegen wird alles Blut, welches jenseits der verschlossenen Stelle befindlich ist, nicht nur nicht aspirirt, sondern sogar am Fliessen gehindert. Poisseuille hat einen Versuch gemacht, welcher das hemmende Moment der Inspiration ausser allen Zweifel setzt. Er hatte einen Hämodynamometer mit der *vena iliaca* in Verbindung gesetzt und beobachtete den Blutdruck, nachdem er die Luftröhre des Thieres unmittelbar nach einer Ausathmung geschlossen hatte. In Folge der Athemnoth wurden die Inspirationen immer heftiger, aber in gleichem Masse wurden auch die Druckwerthe immer grösser. Hätte die Einathmung auf das Venenblut der Bauchhöhle aspirirend gewirkt, so hätte mit zunehmender Heftigkeit der Inspirationen das Quecksilber immer tiefer und endlich unter 0 sinken müssen, wie dies in den grossen Venenstämmen in der Nähe des Brustkastens wirklich geschieht, weil hier wirklich aspirirt wird. Wenn nun bei heftigem Einathmen statt eines tieferen Sinkens ein höheres Steigen des Quecksilbers eintrat, so kann dies nicht anders gedeutet werden, als dass die Widerstände immer grösser wurden.

Hiernach ist klar, dass die Aspiration neben dem fördernden auch ein hemmendes Moment enthalte, jenes für das Blut in nächster Nähe des Herzens, dieses für den Inhalt der entfernteren Gefässe. Ehe nicht ermittelt ist, welches der beiden Momente vorherrsche, ist ein Urtheil darüber, ob die venöse Strömung durch das Einathmen begünstigt werde, natürlich nicht möglich.

Sind diese Betrachtungen richtig, so würde der Einfluss des Athmens auf die Blutbewegung im grossen Kreislauf nahezu = 0 sein. Die Exspiration würde in den Arterien die Bewegung fördern, in den Venen hemmen, die Inspiration würde den Blutlauf in den Venen begünstigen, in den Arterien dagegen beeinträch-

*) Von Poisseuille, Oesterreicher und mir selbst oft beobachtet.

tigen, und annäherungsweise würden Vortheile und Nachtheile auf beiden Seiten sich ausgleichen.

Anlangend den kleinen Kreislauf, so kann der Act der Einathmung auf den Blutlauf durchaus keinen Einfluss haben, da alle zu demselben gehörigen Blutgefässe im Inneren der Brusthöhle selbst liegen. Aspiration ist nur möglich, wenn Fluida, welche sich in verschiedenen, aber unter einander zusammenhängenden Gefässen befinden, einem verschiedenen Luftdrucke ausgesetzt sind, und im Systeme des kleinen Kreislaufs findet diese Bedingung nicht statt. Aber auch die Exspiration wird ohne Wirkung sein. Denn da der Druck, welcher die Lungenarterien und Lungenvenen trifft, gleichzeitig und in gleichem Masse die linke Herzhälfte comprimirt, in welche das Blut der Gefässe abfliessen sollte, so ist trotz des vermehrten Drucks auf Arterien und Venen ein Grund zu vermehrtem Blutabfluss nicht gegeben.

Die vorstehenden Betrachtungen beabsichtigen nicht zu beweisen, dass ein fördernder Einfluss des Athmens auf den Kreislauf des Blutes unmöglich sei, sondern sollen nur darthun, dass der Mechanismus des Athmens, so weit wir ihn kennen, einen derartigen Einfluss nicht voraussetzen lasse.

Halten wir uns an die Erfahrung, so ist unzweifelhaft, dass die Athembewegungen für den Blutlauf keine unentbehrliche Bedingung abgeben. Bei den kaltblütigen Thieren, deren muskelschwaches Herz vorzugsweise einer äusseren Unterstützung bedürftig scheinen könnte, finden Athembewegungen, welche durch Aspiration oder Druck den Blutlauf begünstigen könnten, gar nicht statt. Bei den Säugethieren aber dauert der Kreislauf auch bei geöffnetem Thorax fort, wenn man den Lungen künstlich Luft zuführt, ein Beweis, dass die Respiration nicht von Seiten der Mechanik, sondern des Chemismus für die Blutbewegung unentbehrlich ist. Dasselbe lehrt der Kreislauf des Fötus.

Erfahrungen, welche bewiesen, dass die Respirationsbewegungen, wenn auch nicht unentbehrlich für den Blutlauf, doch förderlich wären, liegen nicht vor. Alle Beobachtungen und

Experimente, welche zu Gunsten der letzteren Ansicht angeführt werden, beweisen mehr nicht, als dass die Blutbewegung in einem gewissen Abschnitte des Gefässsystems und vorübergehend eine Beschleunigung erfahre.

§ 159. Die Erfahrungen über den Einfluss der Exhalation auf die Saftbewegung der Pflanzen rechtfertigen die Frage, ob die Ausdünstung im Thierkörper einen entsprechenden Einfluss auf die Bewegung des Blutes ausübe. Hales bewies durch treffliche Versuche, dass Baumzweige, welche man mit dem abgeschnittenen Ende in ein Gefäss mit Wasser steckt, letzteres mit grosser Kraft aufsaugen, und dass diese Aufsaugung ihren Grund in der Aushauchung der Blätter habe.*) Alle Umstände, welche die Verdampfung des Wassers in den Blättern vermehren, Trockenheit der Luft, Wärme und Sonnenschein, steigern die Kraft der Aufsaugung und vermehren also die Schnelligkeit, mit welcher die aufgesogenen Wassertheilchen durch den betreffenden Zweig hindurch eilen. Umgekehrt haben alle Umstände, welche die Exhalation beschränken, wie nasse Luft, Kälte u. s. w., die entgegengesetzte Wirkung.

Im Thierkörper findet nun ebenfalls eine Aushauchung wässriger Stoffe statt, sowohl in den Capillaren des Körpers als in denen der Lunge. Wenn die Körpercapillaren Wasser aushauchen, so entsteht durch die ausgetretene Masse ein locales Minus der Spannung, und es könnte scheinen, als ob das gestörte Gleichgewicht nur durch den Zufluss des Arterienblutes herstellbar wäre, indem die Klappen der Venen einen Rückfluss gegen die Haargefässe unmöglich machten. Wäre dies in Richtigkeit, so würde allerdings die arterielle Strömung und folglich die Blutbewegung überhaupt durch die Exhalation in den Körpercapillaren begünstigt werden. Aber eine geringe Ueberlegung wird ausreichen zu zeigen, dass die Venenklappen hier nicht in

*) Hales, Statik der Gewächse. Halle 1748.

Betracht kommen können, und dass die durch die Exhalation vermittelte Aspiration des Blutes gegen die Haargefässe die Circulation in den Arterien nicht mehr begünstige, als die in den Venen behindere.

Der Austritt von Wassertheilchen kann in den Thieren schon deshalb nicht denselben Erfolg haben wie bei den Pflanzen, weil die säfteführenden Kanäle bei letzteren mit einfachen, an beiden Enden offenen Röhren vergleichbar sind, bei den Thieren dagegen mit einem in sich selbst zurücklaufenden kreisförmigen Schlauche. Wenn bei der Pflanze in den Blättern viel ausgehaucht und dem entsprechend in den Wurzeln viel aufgesogen wird, so muss durch die saftführenden Kanäle, welche zwischen Wurzeln und Blättern liegen, auch viel fliessen, d. h. die Saftbewegung muss eine schnelle sein. Nicht so bei den Thieren. Wenn an einem Punkte der kreisförmigen Gefässhöhle viel exhalirt und an einem anderen Punkte der reichlichen Ausscheidung entsprechend viel resorbirt wird, so bewirkt dies nur einen raschen Stoffwechsel, nicht aber einen raschen Blutumlauf. Zwar begünstigt die Exhalation die Blutbewegung wirklich, aber die Resorption behindert dieselbe in ganz entsprechendem Grade. Man kann sich diese Behinderung so vorstellen, als ob die in die kreisförmige Gefässhöhle resorbirten Stoffe im Momente des Eintretens die circulirende Blutmasse aufhalten. Noch einfacher ist folgende Betrachtung: Die Geschwindigkeit der Blutbewegung ist dadurch bestimmt, dass die gesammte Blutmasse in einer gegebenen Zeit ihren Umlauf oder eine Circulation vollendet. An dieser Geschwindigkeit wird aber nichts geändert, wenn das Blut auf seinem Wege irgendwo einen Theil seiner Masse austreten lässt und dafür einen ebenso grossen Theil anderer Substanzen in sich aufnimmt. Die Veränderung, welche hierbei vor sich geht, beschränkt sich auf den Stoffwechsel.

§ 160. Wenn wir im Vorhergehenden die bewegende Kraft im Blutkreislaufe aufsuchten, d. h. die Kraft, welche verursacht, dass eine bestimmte Blutmasse mit einer bestimmten Geschwin-

digkeit durch die Gefässbahn hindurchströmt, so haben wir bisher keine andere gefunden als die des Herzens, welche erwiesener Massen der gestellten Aufgabe gewachsen ist. Um so befremdlicher ist es, dass so viele Physiologen von der Wirkung des Herzens fast gänzlich absahen und an andere bewegende Kräfte dachten.

Nicht selten entsprang ein Misstrauen in die Herzkraft aus theoretischen Gründen. Das Herz mit seinen Stössen wirkte mechanisch, und man verlangte zur Erklärung der Lebensverrichtungen nicht mechanische, sondern organische Kräfte. Es ist meine Absicht durchaus nicht, auf den Prinzipienstreit über den Unterschied lebendiger und nicht lebendiger Kräfte hier näher einzugehen, es genüge anzudeuten, dass man in der Lehre vom Kreislaufe, wie in allen übrigen Abschnitten der Physiologie, sich von der Mitwirkung physikalischer Kräfte und von der Gültigkeit physikalischer Gesetze in demselben Masse mehr überzeugt, als unvollständiges Wissen und unklare Vorstellungen einer gründlichen Erkenntniss weichen. Es hat sich gefunden, dass der Blutdruck eine Folge der Reibung ist und nach derselben Gesetzlichkeit, wie in todten Röhren, von der Einflussmündung nach der Ausflussmündung abnimmt; es ist gezeigt worden, dass die Geschwindigkeit der Blutbewegung sich in strenger Abhängigkeit von der Weite der Gefässe befindet; wir haben dargethan, dass der Druck, unter welchem sich die Blutgefässe befinden, und die Geschwindigkeit, mit welcher das Blut strömt, in einem derartigen gesetzlichen Verhältnisse zu einander stehen, dass die Veränderungen des einen aus den Veränderungen des anderen mit Hülfe hydrodynamischer Formeln berechnet werden können. Wer nach solchen Erfahrungen den Einfluss des Physikalischen in den Vorgängen der Blutbewegung nicht anerkennt, mit dem dürfte eine Verständigung nicht möglich sein.

Am häufigsten entsprang wohl das Misstrauen zu den mechanischen Wirkungen der Herzthätigkeit aus den teleologischen Grundansichten der Physiologen. Man erkannte in den Vorgän-

gen der Blutbewegung eine Verwirklichung organischer Zwecke und suchte nach einem Prinzipe, welches zur Durchführung dieser geeignet wäre. Darum setzte Stahl den Ursprung alles Lebens in die Seele, nur sonderbarer Weise in eine unbewusste Seele, welche in dieser Verfassung dem Determinismus nicht minder verfiel als die organische Maschine der Jatromathematiker.

Man kann die hohe Zweckmässigkeit in den Lebensvorgängen im vollsten Masse anerkennen, ohne die Nothwendigkeit eines besonderen Prinzips einzuräumen, welches sie verwirkliche. Die Zweckmässigkeit der Functionen reicht so weit, als die ein für alle Mal getroffenen organischen Einrichtungen dies gestatten. Treten zufällige Bedingungen ein, für welche die Einrichtung nicht im Voraus mit berechnet war, so hört nicht nur das zweckmässige Wirken auf, sondern es kommt sogar vor, dass der Organismus sich zum Schaden arbeitet. Die Vorgänge des Kreislaufs bieten zahllose Belege zu diesen Behauptungen.

Wenn wir eine Vene unterbinden, schwillt sie an; dies ist vom physikalischen Standpunkte aus nothwendig, vom teleologischen ungehörig, denn was bezweckt eine Ansammlung von Blut in einer undurchgängigen Bahn? Wenn wir eine Arterie durchschneiden, so fliesst nicht nur ebenso viel Blut durch dieselbe als vorher, was den Umständen nach schon zwecklos zu nennen ist, sondern es fliesst weit mehr durch, was nachtheilig und den Lebenszwecken geradezu entgegen wirkt. Wenn eine Arterie sich aneurismatisch erweitert, wobei die Wandungen dünner werden, so sollte eine weise Lebenskraft den localen Blutdruck vermindern, aber der Blutdruck wächst nach hydrodynamischen Gesetzen, er wächst wie der Umfang des kranken Gefässes und führt vielleicht eine Zerreissung der Wandungen herbei, welche mit dem Tode endigt.

Fassen wir den Vorgang des Blutkreislaufs in grösster Allgemeinheit auf, so handelt es sich um die Fortbewegung einer Flüssigkeit durch Röhren, welche kreisförmig in sich selbst zu-

rückkehren, und um die Durchführung dieser Bewegung in einer bestimmten Zeit. Diese Aufgabe ist rein mechanischer Natur, nichts hindert anzunehmen, dass die Herzpumpe als mechanisches Mittel ausreiche, sie zu lösen. Wenn nun in den spezielleren Vorgängen des Blutkreislaufs es bei jener allgemeinen Aufgabe nicht verbleiben kann, wenn vielmehr in gewissen Organen und zu gewissen Zeiten Erscheinungen sich geltend machen, deren Lösung durch den Herzdruck nicht möglich ist, so wüsste ich nicht, was hieraus weiter folgte, als dass man nach anderweitigen Einrichtungen zu suchen habe, welche für die eintretenden Modificationen der Bewegung die geeigneten Bedingungen bieten. Allerdings ist zuzugeben, dass die Erscheinungen des Erröthens und Erbleichens oder das Anschwellen turgescirender Glieder, desgleichen die localen Vorgänge der Entzündung vom Herzdruck allein nicht ausgehen können, nur lässt sich hierauf kein Vorwurf gegen das Herz im Allgemeinen begründen, denn die Production jener Phänomene ist gar nicht seine Sache, sondern die besonderer Apparate.

Wir erklären uns also gegen diejenigen, welche von dem Einflusse des Herzens auf die Blutbewegung nur deshalb abstrahiren, weil das Herz nicht die ganze Summe der verwickelten Vorgänge verständlich mache. Das Herz soll in dem hämodynamischen Prozesse gar nicht Alles in Allem leisten, und wer an die Spitze sämmtlicher Vorgänge im Blutleben ein Prinzip stellen wollte, welches das Dasein geeigneter Bedingungen für jede einzelne Leistung entbehrlich machte, der dürfte vergeblich nach einem solchen zu suchen haben.

§ 161. Ich habe im Vorhergehenden gezeigt, wie theoretische Vorurtheile eine Missachtung der Herzkraft hervorriefen; im Folgenden will ich zeigen, wie gewisse Missverständnisse in der Deutung des Thatsächlichen dieselbe Wirkung hatten.

Man berief sich zunächst auf den Kreislauf der Säfte in den Pflanzen, welcher ohne Mitwirkung eines Herzens zu Stande komme. Ich lasse dahin gestellt, ob von einem eigentlichen

Kreislaufe der Säfte in den Pflanzen füglich die Rede sein könne, und bemerke nur, dass eine derartige Berufung überhaupt nicht zulässig sei. Die Pflanze vermittelt Vorgänge, welche mit denen des Thierkörpers immer nur eine allgemeine Aehnlichkeit haben, auf so eigenthümliche Weise und durch so ganz anders gebildete Organe, dass aus dem, was in ihr geschieht, auf das, was im Thierkörper geschehe, überhaupt nie gefolgert werden kann. Die Pflanze verarbeitet z. B. die Nahrungsmittel, welche sie aufnimmt, ohne Verdauungsorgane, und so wenig sich hieraus folgern lässt, dass auch das Thier ohne solche sich nähren könne, ebenso wenig gestattet die Saftbewegung, welche in den Vegetabilien ohne Mitwirkung eines Druckwerkes durchgeführt wird, die Annahme, dass auch im Thiere die Stosskraft des Herzens entbehrlich sei.

Mit wenig besserem Rechte berief man sich auf die Blutbewegung in Embryonen und niederen Thieren. Im bebrüteten Eie soll nach Angabe einiger Beobachter die Blutbewegung im Gefässhofe früher beginnen als der Herzschlag, indess ist die Thatsache selbst noch keineswegs erwiesen. Gesetzt übrigens, sie wäre es, so würde sich ihre Beweiskraft doch nur auf den eben beobachteten Fall beschränken. Die Analogie der Functionen in verschiedenen Thierarten oder auch derselben Art auf verschiedenen Entwickelungsstufen berechtigt nicht, die Mittel, durch welche dieselben verwirklicht werden, für gleich zu halten, denn die Natur, nicht minder als die Mechanik, erreicht dieselben Zwecke auf verschiedenem Wege. Wie es nun Niemandem beikommen wird, den Uterus beim Geburtsacte des Weibes für entbehrlich zu halten, weil es Thiere giebt, welche ohne Uterus und ohne Wehen ihre Nachkommenschaft hervorbringen, so sollte man sich hüten, die Entbehrlichkeit des Herzens bei den Vertebraten aus dem Umstande zu folgern, dass bei vielen Wirbellosen eine Saftbewegung ohne Herzdruck allerdings zu Stande kommt. Die Berufung auf Embryonalzustände ist aber fast noch misslicher als das Zurückgehen auf die Lebensverhältnisse nie-

derer Thierarten. Im Keime beginnt das Leben schon vor der Entwickelung bestimmter Organe, denn das Entstehen dieser ist ja selbst schon ein Lebensact. So findet Nutrition statt zu einer Zeit, wo alle Nutritionsorgane und selbst die Blutgefässe noch fehlen; so pulsirt das Herz zu einer Zeit, wo vom Dasein der Muskelfaser noch gar nicht die Rede ist. In reifen Thieren kann Derartiges nicht vorkommen, in ihnen sind die Functionen durch die Organe bedingt und erscheinen schlechthin als eine Thätigkeit dieser. Es versteht sich hiernach von selbst, dass die Vorgänge der Blutbewegung in unreifen Embryonen keinen Aufschluss über die Mittel gewähren, durch welche der Kreislauf im vollkommen entwickelten Thiere bewirkt wird.

§ 162. Als Beleg, dass das Blut auch ohne Mitwirkung des Herzens circuliren könne, sind mehrfach die herzlosen Missgeburten angeführt worden, welche bisweilen einen hinlänglichen Grad von Entwickelung zeigen, um Schlüsse auf den zur Reife gelangten Organismus zuzulassen. Aber auch diese Fälle bieten keine genügenden Beweise. Wir wissen nicht einmal mit Sicherheit, ob in jenen missgebildeten Früchten ein wahrer Kreislauf bestehe, ja in einigen Fällen würde den anatomischen Berichten zu Folge ein Kreislauf kaum möglich scheinen. In einem Falle, den Schellhammer beschrieben, wurden die Nabelgefässe ganz vermisst; Büttner und Lamure versichern, herzlose Missgeburten zergliedert zu haben, wo der Nabelstrang nur eine Vene enthielt, und selbst der als Anatom so hochgeachtete Winslow beschreibt einen Fall, wo die Venen fehlten, und bemerkt ausdrücklich, dass also die Rückkehr des Blutes aus den Organen unmöglich gewesen wäre.*) Derartige Fälle verdienen keine besondere Berücksichtigung, sie sind unklar und eben deshalb zur Entscheidung physiologischer Streitfragen ungeeignet.

Ueberhaupt aber könnten die herzlosen Missgeburten in der Frage nach den blutbewegenden Kräften nur dann etwas ent-

*) Meckel, pathol. Anatom. Leipzig 1812. I. S. 163.

scheiden, wenn erwiesen wäre, dass ihnen nicht nur ein vollständiges Herz, sondern auch jedes als Herz fungirende Organ fehlte. Bei den Würmern vertreten pulsirende Gefässe die Stelle des Herzens, und bekanntlich entwickelt sich dasselbe, auch in den vollkommensten Geschöpfen, aus einem einfachen pulsirenden Schlauche. Bliebe die Organisation durch Hemmungsbildung auf dieser Stufe stehen (und wirklich zeigen die herzlosen Monstra die unverkennbarsten Spuren gehemmter Bildung), so wäre der Kreislauf vollkommen verständlich, auch wäre streng genommen dann nicht von einem Mangel des Herzens, sondern nur von einer unvollkommneren Form desselben die Rede. In der That hat Tiedemann den Blutlauf der herzlosen Missgeburten von pulsirenden Gefässen abgeleitet.

In einigen Fällen ist ganz unzweifelhaft, dass der Kreislauf der herzlosen Missgeburt durch die Herzkraft eines Zwillingsfötus vermittelt wurde. Joh. Müller führt drei Fälle an, wo die Gefässe des herzlosen Monstrums nur Aeste der Nabelgefässe eines zweiten vollständigen Kindes waren, so dass die Missgeburt wie ein Organ des letzteren ernährt wurde.*) Wahrscheinlich gehört hierher auch ein von Marigues beobachteter Fall, wo sich im Nabelstrange weder die Nabelvene noch die Nabelarterien, wohl aber eine Menge äusserst feiner Gefässzweige vorfanden;**) desgleichen zwei von Herholdt und von Busch beschriebene Fälle, in welchen sich die Nachgeburten der Zwillingskinder verwachsen fanden.***)

Ziemlich nahe liegt die Vermuthung, dass alle *monstra acardiaca* sich hinsichtlich des Kreislaufs in demselben Falle befinden, denn allem Anscheine nach kommt Mangel des Herzens nur

---

*) Joh. Müller, Handbuch der Physiologie. 3. Ausgabe I. p. 169.

**) *Mémoires de mathem. prés. à l'acad. des Sc. IV.* p. 123. abgedruckt in *Brechet répertoir général d'anat. et de physiol. II.* p. 3.

***) Herholdt, Beschreibung 6 menschlicher Missgeburten. Kopenhagen 1830. p. 22 und Busch, Beschreibung zweier merkwürdiger menschlicher Missgeburten. Marburg 1803.

in Fällen vor, wo neben der Missgeburt noch ein wohlgebildeter Fötus vorhanden war. Unter 72 Beobachtungen herzloser Früchte, welche Elben gesammelt hat, befindet sich nur eine kleine Anzahl, wo die Gegenwart des Zwillingsfötus nicht ausdrücklich bemerkt wurde, und in dieser kleinen Anzahl von Fällen ist keiner, in welchem der Geburtsact beschrieben und hiermit die Vollständigkeit der Beobachtung nur einigermassen verbürgt wäre.*)

§ 163. Auch die Ergebnisse der Experimentalphysiologie sind benutzt worden, um nachzuweisen, dass der Kreislauf des Blutes noch durch andere Kräfte als die des Herzmuskels vermittelt würde. Man behauptete, dass die Blutbewegung in den Haargefässen auch dann fortdauere, wenn die Wirksamkeit des Herzens durch künstliche Mittel unterdrückt würde, und folgerte hieraus, dass der Herzdruck in der Bewegung der Blutmassen nur eine untergeordnete Rolle spiele.

Anlangend das Thatsächliche, so ist richtig, dass auch nach Beseitigung der Herzkraft Erscheinungen von Blutbewegung wirklich vorkommen, aber diese Erscheinungen sind denen des normalen Kreislaufs viel zu unähnlich, um zu dem Schlusse zu berechtigen, dass auch bei letzterem die Mitwirkung des Herzens entbehrlich sei. Man wird zu untersuchen haben, ob die Blutbewegung, welche nach Aufhebung des Herzdrucks stattfindet, nicht dennoch von diesem abhänge, indem eine Bewegung so lange fortdauert, bis die Kraft des entgegenstehenden Widerstandes sie aufhebt. Man wird ferner zu ermitteln haben, inwiefern die bei unthätigem Herzen vorkommende Blutbewegung sich als Folge solcher Kräfte betrachten lasse, welche durch die Eingriffe des Experimentes, also künstlich gesetzt sind.

Wenn man den Blutlauf in einem abgeschnittenen Organe, z. B. in einem Gekröse, in einer Kieme oder in der Schwimmhaut eines Frosches, mikroskopisch betrachtet, so sieht man un-

*) Elben, *de acephalis sive monstris corde carentibus. Berolini* 1831.

mittelbar nach der Trennung des Gliedes eine Strömung, welche nicht nur in den Venen, sondern auch in den Arterien von den Aesten gegen die Stämme gerichtet ist. In vielen Fällen ist dies die einzige Bewegung, welche man zu sehen bekommt und welche meistens nur wenige Minuten anhält; es liegt am Tage, dass man es hier nur mit einem Ausfliessen des Blutes aus der Wundfläche zu thun habe.

Bisweilen dauert die rückgängige Bewegung des Blutes in den Arterien nur kurze Zeit und die Strömung nimmt wieder die normale Richtung an. Poisseuille bemerkte, dass dies von Verstopfung der Arterienmündungen durch Blutpfröpfe abhänge.*) Entfernt man diese mit einer Nadel, oder frischt man die Wundfläche durch einen neuen Schnitt an, so kehrt das ursprüngliche Phänomen zurück, das Blut fliesst in den Arterien abermals rückwärts.

Derartige Strömungen können, abgesehen von anderen Gründen, auf welche ich später zurückkommen werde, schon darum nicht ausbleiben, weil sich das Blut im lebenden Thiere unter einem Drucke befindet, welcher höher ist als der der Atmosphäre. Wird also ein Organ vom Körper getrennt und hiermit die Gefässhöhle geöffnet, so muss aus statischen Gründen das Blut ausströmen, bis sich der Druck der Gefässhöhle mit dem der Atmosphäre ins Gleichgewicht gesetzt hat. Dies übersah Schultz, wenn er zur Begründung seiner antimechanischen Theorien des Falles gedenkt, dass das Blut nach Unterbindung der Aorte und Hohlvene aus einer offenen Ader selbst gegen die Richtung der Schwere ausströme.**) Auch wenn unter solchen Umständen, wie Schultz angiebt, Verblutung erfolgte, wäre die Annahme spezifischer Kräfte, welche das Blut aus den Adern trieben, vollkommen überflüssig. Der Tod durch Blutverluste erfolgt viel

*) Poisseuille, *Recherches sur les causes du mouvement du sang dans les vaisseaux capillaires*, 1835. *exp. IX.*

**) C. H. Schultz, das System der Circulation. Stuttgart und Tübingen 1836. S. 269.

früher, als alles Blut aus dem Körper entleert ist, und es ist von dieser Seite ganz unbedenklich anzunehmen, dass die Ausgleichung der Druckdifferenz auch bei unthätigem Herzen eine Verblutung veranlassen könne.

Wird bei einem Thiere die Aorte oder das Herz selbst unterbunden, so sieht man an durchsichtigen Theilen eine Strömung aus den Arterien durch die Haargefässe in die Venen, wobei letztere sich mehr und mehr füllen und bisweilen bedeutend anschwellen. Dieses Strömen geschieht also in der normalen Richtung des Kreislaufs und dauert bisweilen eine halbe Stunde und länger, wobei zu bemerken, dass die Bewegung der Blutkörperchen in der Regel sehr langsam ist und von Minute zu Minute an Schnelligkeit abnimmt.

Um diese Erscheinungen begreiflich zu finden, erwäge man vor Allem, dass die Arterien durch den Seitendruck viel stärker gespannt sind als die Venen, dass sie also bei Unterbindung des Herzens oder der Aorte sich vermöge ihrer Elasticität zusammenziehen und so lange Blut durch die Haargefässe in die Venen treiben müssen, bis die Differenz der Spannung ausgeglichen ist. Natürlich müssen nun die Venen mehr anschwellen, auch begreift sich, dass die Strömung von Minute zu Minute langsamer werde, denn die Geschwindigkeit entspricht der Spannungsdifferenz und diese nimmt in demselben Masse ab, als mehr Blut aus den Arterien in die Venen übergeführt wurde.

Hiernach kann nur die lange Dauer der Strömung befremdlich erscheinen, aber auch diese Schwierigkeit lässt sich vollständig beseitigen. Ich glaube bemerkt zu haben, dass in den seltenen Fällen, wo die Blutbewegung den Herzschlag eine halbe Stunde oder länger überdauert, der grösste Theil der Haargefässe für das Blut undurchgängig ist. Ich habe sogar einen Fall beobachtet, wo in der Schwanzflosse eines Fisches das Blut in einer einzigen Arterie und in einer einzigen Vene strömte. Es bedarf der Bemerkung kaum, dass unter solchen Umständen die Aus-

gleichung der Spannungsdifferenz zwischen Arterien und Venen ausserordentlich verzögert werden müsse.*)

Ausser der eben erwähnten Ursache wirkt noch eine zweite. Wie oben bemerkt, besitzen die Arterien ausser der elastischen Contractilität auch eine vitale, vermöge welcher sie sich bis auf die Hälfte, ja bis auf ein Drittel und selbst auf noch kleinere Masstheile ihres Durchmessers zusammenziehen, wenn sie nicht durch den Seitendruck des in ihnen befindlichen Blutes an dieser Contraction behindert werden. Diese vitalen Zusammenziehungen gehen überhaupt sehr langsam vor sich, und da sie an verschiedenen Stellen des Arteriensystems früher oder später nach Unterbindung des Herzens beginnen können, so ist die Zeit, binnen welcher die Contraction des Arteriensystems ihr Maximum erreiche, überhaupt ganz unbestimmt.

Dass nun das langanhaltende Strömen des Blutes aus den Arterien durch die Capillaren in die Venen in Fällen, wo das Herz ausser Thätigkeit gesetzt worden, wirklich durch die Zusammenziehung der Arterien veranlasst werde, wird dadurch höchst wahrscheinlich, dass der Durchmesser der letzteren in solchen Experimenten sichtlich abnimmt. Zwar könnte die Zusammenziehung der Arterien, welche wir im Vorhergehenden als activ betrachteten, auch passiver Natur sein; denn wenn irgend eine vitale Kraft das Blut durch die Capillaren triebe, so müssten die in den Arterien befindlichen Massen nachdringen, und die Schlagadern müssten zusammensinken; indess kann diese zweite Möglichkeit hier kaum in Anschlag kommen. Eine vitale Kraft, welche das Blut durch die Haargefässe triebe und eine Verengerung der

*) Die eben erwähnte Undurchgängigkeit zahlreicher Haargefässe erklärt auch noch ein anderes Phänomen, an welchem man Anstoss nehmen könnte, nämlich die Schnelligkeit der Blutbewegung, welche nach Unterbindung des Herzens und der Aorte in einzelnen Fällen beobachtet wird. Es versteht sich nämlich von selbst, dass die Verstopfung zahlreicher Capillaren als Verschmälerung des Strombetts diene und eine locale Beschleunigung der Strömung herbeiführe.

entleerten Schlagadern durch den Luftdruck veranlasste, ist nicht bekannt.

Eine Erscheinung, welche nach Beseitigung der Herzkraft (aber auch in sterbenden Thieren, vor dem gänzlichen Stillstande des Herzens) häufig vorkommt, ist eine oscillirende Bewegung. Das Blut bewegt sich in solchen Fällen abwechselnd hin und her, einmal von den Arterien durch die Capillaren in die Venen und dann in umgekehrter Richtung. Gewöhnlich liegt zwischen den beiden entgegengesetzten Bewegungen eine Pause, in welcher das Blut still steht. Bisweilen zeigen diese Oscillationen eine fast pendelförmige Gleichförmigkeit, sehr häufig aber auch nicht.

Obgleich diese Bewegungen unabhängig vom Herzen zu Stande kommen, so ist doch kein Grund vorhanden, sie von Kräften abzuleiten, welche den Herzstoss beim normalen Kreislauf unterstützten oder gar entbehrlich machten. Offenbar beruhen diese Oscillationen auf Bedingungen, welche im gesunden Leben weder vorkommen noch vorkommen dürfen, und in diesem Bezuge ist es wenig wichtig, den Ursachen derselben weiter nachzuforschen.

§ 164. Ich sehe keinen Grund anzunehmen, dass die Blutbewegung, welche nach Beseitigung der Herzkraft vorkommt, von spezifischen Lebenskräften abhänge. Gleichwohl sind solche von sehr vielen Physiologen zu Hülfe genommen worden. Bichats Hypothese, dass das Leben der Haargefässe am Blutlaufe wesentlichen Antheil habe, ist schon oben beleuchtet und widerlegt worden. Andere haben zu einer Selbstbewegung des Blutes ihre Zuflucht genommen, ohne jedoch auch nur im Entferntesten anzudeuten, wie sich mit einer solchen Annahme eine klare Vorstellung verbinden lasse. Das Blut, inwiefern es mit allen physikalischen Eigenthümlichkeiten einer Flüssigkeit begabt ist, könnte offenbar nur dann sich selbst bewegen, wenn jedes seiner Moleküle der Selbstbewegung theilhaftig wäre. Dergleichen vorauszusetzen ist schon *a priori* wenig einladend, und alle Erfahrungen sprechen gegen die Spontaneität der Theilchen. Der

Blutstrom gewährt bei mikroskopischer Betrachtung durchaus das Ansehen einer verschobenen Masse. Die Blutkörperchen schwimmen wie Flossholz in einem Strome, stets abwärts, nie stromaufwärts, eins hinter dem anderen, keins schneller als die übrigen, nur die Fälle ausgenommen, wo eine ungleich schnelle Bewegung aus mechanischen Gründen gefordert ist. So schwimmen die Blutkörperchen in der Mitte des Gefässes schneller als die an den Seiten, wie auch Körper, welche in der Mitte eines Stroms schwimmen, schneller mit fortgeführt werden als Körper, welche sich ausserhalb des Hauptstroms in der Nähe der Ufer befinden. Stösst ein Blutkörperchen, welches mehr vorn schwimmt, an einen Gefässwinkel, so wird es aufgehalten und von einem anderen überholt, welches hinter ihm her schwamm. Comprimirt man eine kleine Arterie, welche nur wenigen Blutkörpern neben einander Raum giebt, so steht das Blut augenblicklich still, sowohl vor als auch hinter der Stelle der Compression, und zwar bis zu den beiden Punkten, wo das Gefässchen Aeste abgiebt, die dem bewegenden Momente wieder einen Einfluss gestatten. In dem Abschnitte, wo das Blut ruht, verschwindet der durchsichtige Raum an den Rändern des Gefässes, welcher durch die unbewegliche Serumschicht veranlasst wird, und die Blutkörperchen treten bis an die Gefässwandung, gewiss nicht aus einem inneren Triebe, sondern in Folge eines mechanischen Grundes. Auch sind die Bewegungen, welche man in einem Blutstropfen wahrnimmt, den man im Sonnenlichte unter dem Mikroskope beobachtet, nicht vitaler Art; ganz ähnliche Molekularbewegungen werden unter gleichen Umständen in anorganischen Flüssigkeiten wahrgenommen.

Zu den unbrauchbaren Hypothesen, welche man ersann, um eine Hülfskraft für das Herz zu gewinnen, die gar nicht nöthig war, gehörte auch die, dass die organischen Gewebe das Blut an sich zögen. Wäre dies richtig, so müsste das Quecksilber eines Hämodynamometers, welchen man in das peripherische Ende einer durchschnittenen Arterie einführt, unter Null sinken; statt

dessen steigt es und zwar in manchen Fällen bis zu der ausserordentlichen Druckhöhe von 150 Millim. In der That aber erweist man jener Hypothese zu viel Aufmerksamkeit, wenn man ihr Beobachtungen entgegen stellt; es versteht sich von selbst, dass eine Kraft, welche das Blut anzöge, das Blut auch halten würde; hieraus ergiebt sich für die Bewegung kein Vortheil.

In diesem Bezuge hat sich C. W. Stark ein logisches Verdienst erworben, indem er der Attractionskraft gegenüber auch noch eine Propulsionskraft fingirte. Nach seiner Theorie sollen die Haargefässe, in welchen das Blut carbonisirt wird, eine Anziehungskraft für das arterielle und eine Propulsionskraft gegen das venöse Blut besitzen; die Haargefässe, in welchen das Blut oxygenisirt wird, gerade umgekehrt. Ganz entsprechend äussert sich Grabau, welcher den Grund des Kreislaufs in der Polarität des Blutes sucht. Das arterielle Blut hat die Bestimmung, venös, das venöse die Bestimmung, arteriell zu werden; dies ist der ideale Zweck des Kreislaufs, und in der Natur soll der Gedanke verkörpert und die Kraft des Dinges selbst sein.

Wenn man die Blutmetamorphose als den Grund des Kreislaufs betrachtet und behauptet, das venöse Blut fliesse nach den Lungen und das arterielle nach den Organen, um hier und dort die Prozesse zu vermitteln, welche die Idee des Lebens fordert, so verwechselt man das Weil des Zwecks mit dem Weil der Ursache. Zwar protestirt Grabau gegen eine Trennung beider ausdrücklich und behauptet, dass die Idee, nach welcher der organische Prozess hinstrebe, die Kraft selbst sei, welche ihn ausführe, aber offenbar mit Unrecht. Zwischen dem idealen Zweck und dessen realer Ausführung liegen als vermittelnde Glieder die geeigneten Bedingungen; wäre dem anders, so wäre die Hintertreibung jener Zwecke durch willkürliche Umstellung der Bedingungen eine Sache der Unmöglichkeit. Dass nun die Blutmetamorphose das Mittel nicht ist, durch welches die Blutbewegung zu Stande kommt, lehrt einfach die Erfahrung, dass auch nach Störung derselben der Blutlauf fortdauert. Selbst von Säuge-

thieren gilt dies einigermassen, wie schon Emmert zeigte,*) besonders bei jüngeren Individuen und Winterschläfern; bei Amphibien aber und besonders bei Schildkröten (bei welchen nicht einmal von Hautathmung die Rede sein kann) überdauert der Kreislauf die Unterdrückung der Respiration oft Tage lang. In solchen Fällen kreist also venöses Blut durch die Adern, was der Hypothese zu Folge weder von den zu ernährenden Organen angezogen, noch von den Lungen, die es vorgeblich anziehen, fortgestossen werden dürfte.

§ 165. Schon bei Haller und Spallanzani finden sich Beobachtungen in Menge, welche über die Ursachen der Blutbewegung bei gestörter Herzkraft hinreichendes Licht verbreiten, und jeder vorurtheilslose Forscher wird in dieser Frage nur wenig zu vermissen finden. Im Folgenden werde ich noch einige Thatsachen mittheilen, die mir entscheidend vorkommen.

Spallanzani zeigte, dass, wenn man Arterien oder Venen ansticht, das Blut der benachbarten Gefässabschnitte nach der Wunde hinströmt. Die Folge hiervon ist, dass die Blutbewegung auf der einen Seite des verletzten Gefässes seine Richtung ändert und rückwärts fliesst. Dies geschieht selbst dann, wenn man die Wunde möglichst nahe an den supponirten Mittelpunkten der Attraction anbringt, also in den grossen Venenstämmen und in den kleinsten Arterienzweigen, eine Erfahrung, welche ebenso entschieden für die Wirksamkeit einer Druckkraft als gegen den Einfluss aller jener spezifischen Kräfte spricht, deren im vorigen Paragraphen gedacht wurde.**)

Eine besonders wichtige Beobachtung ist die folgende von Poisseuille.***) Ein Frosch wurde so präparirt, dass der Blutlauf

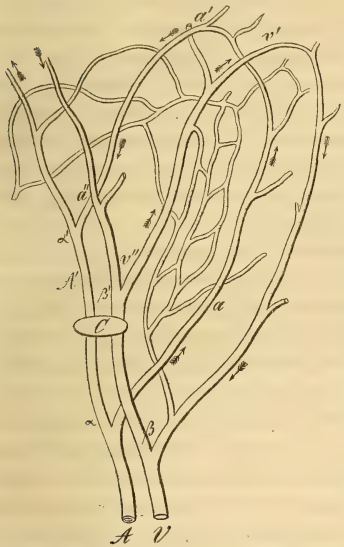
---

*) Reils Archiv V. S. 401.

**) Ich erinnere mich, bei einem Anhänger der spezifischen Lebenskraft die Bemerkung gefunden zu haben, dass das Rückwärtsfliessen des Blutes in angestochenen Arterien sich nur bis auf die Capillaren erstrecke; diese Behauptung ist unbegründet.

***) *Recherches sur les causes du mouvement du sang dans les vaisseaux*

im Gekröse mikroskopisch beobachtet werden konnte, und dass das ausgebreitete Gekröse auf eine Glasplatte zu liegen kam. Unter diesen Umständen war es möglich, durch Aufsetzung kleiner Platingewichtchen auf gewisse Gefässe den Einfluss der *vis a tergo* plötzlich zu beseitigen.



Poisseuille setzte das Gewichtchen bei *C* auf, in der Weise, dass ein Zweig der Arterie *A* und der Vene *V* comprimirt wurde. Zu beiden Seiten des Gewichts hörte die Blutbewegung in beiden Gefässen augenblicklich auf, aber nur zwischen den Punkten $\alpha\,\alpha'$ in der Arterie und zwischen den Punkten $\beta\,\beta'$ in der Vene, d. h. also in demjenigen Abschnitte beider Gefässe, welcher weder Zweige abgab, noch solche aufnahm. Ueber die bezeichneten Punkte hinaus war die Blutbewegung weder in den Arterien noch in den Venen behindert, aber die Richtung des Stroms hatte in gewissen Zweigen eine Veränderung erfahren. So floss das Blut in dem einen arteriellen Zweige von a' nach a'', also rückwärts, und in einem venösen Zweig von v'' nach v', also ebenfalls rückwärts. Eine sorgfältige Betrachtung der Figur kann über den Zusammen-

capillaires, 1835. Eine ähnliche Beobachtung findet sich bei Marshal Hall, *essay on the circulation*. p. 87.

hang dieser Phänomene keine Zweifel übrig lassen und überhebt mich einer weitläufigen Erörterung.

Das theoretisch Wichtige des Versuchs liegt in dem gelieferten Beweise, dass die Richtung des Blutstroms in klappenlosen Gefässen nicht durch deren arteriellen oder venösen Charakter, sondern ausschliesslich durch die Druckdifferenz zwischen zwei gegebenen Punkten bestimmt ist. Bei normalen Verhältnissen fliesst das Blut in dem Arterienzweige a'' peripherisch, nämlich von a''' nach a', weil der Druck bei a'', als dem Punkte, welcher dem Herzen näher liegt, grösser ist als bei a'. Wird dagegen der Stamm bei C verschlossen und hiermit jeder Druck von dem grösseren Zweige A' aus unmöglich, so ist der Druck bei a' stärker als der bei a''; mithin ändert das Blut seine Richtung. Der Hergang ist ein rein mechanischer.

Bei einem kleinen Fische legte ich das Herz frei und zerstörte Gehirn und Rückenmark, Operationen, welche natürlich nicht ohne einen ansehnlichen Blutverlust ausführbar waren. Bei mikroskopischer Untersuchung der Schwanzflosse ergab sich eine merkliche Anämie, doch war der Kreislauf, obschon sehr verlangsamt, noch im Gange. Nun comprimirte mein Assistent das Herz mit einer Pincette. In demselben Augenblicke zeigte sich in sämmtlichen Gefässen ein Ruck, die Blutkörperchen traten vielleicht um das Zehnfache ihres Durchmessers rückwärts und standen hierauf vollkommen still. Der Kreislauf kehrte nach Wegnahme der Pincette nicht zurück, aber auch das Herz erhielt seine Bewegung nicht wieder.

Die Beobachtung scheint mir beachtenswerth, weil sie indirect beweist, dass die Fortdauer der Blutbewegung in den Fällen, wo man das Herz oder die Aorte unterbindet, nur eine Folge der Spannungsdifferenz zwischen Arterien und Venen ist. Nach der Art, wie der Fisch getödtet worden war, und bei dem Zustande äusserster Schwäche, in welcher sich das Herz befand, darf man annehmen, dass in dem Momente, wo das Herz comprimirt wurde, der Unterschied der Spannung zwischen den zuführen-

den und rückführenden Gefässen schon ausgeglichen war. Dass nun die Compression des Herzens eine augenblickliche Stockung des Blutlaufs zur Folge hatte, beweist unverkennbar, dass neben dem Herzpuls eine bewegende Kraft nicht wirksam war.

Bei einem Krebse legte ich das Herz frei und schnitt mit der Scheere eine kleine Oeffnung in dasselbe. Durch diese Oeffnung spritzte ich gefärbtes Wasser ein, jedoch nur tropfenweise und äusserst leise. Von einem gewaltsamen Drucke konnte bei der Injection um so weniger die Rede sein, da die Kanüle der Spritze gar nicht eingebunden worden war, weshalb auch der eingespritzte Farbestoff zum grossen Theile aus der Herzwunde wieder abfloss. Mittlerweile pulsirte das Herz fort, trieb das farbige Wasser durch das ganze Gefässsystem und stellte ein sehr gelungenes Injectionspräparat dar. Die Kiemen waren prächtig roth, die Venen waren gefüllt, wonach anzunehmen, dass selbst die Haargefässe, wenn auch nur theilweise, erfüllt sein mussten. Die Folgerungen aus dieser Beobachtung liegen sehr nahe. Es kann hier weder von einem lebendigen Blute, welches sich selbstständig bewegte, noch von einer Anziehung des Parenchyms die Rede sein; die einzige Ursache des Kreislaufs war die Pulsation des Herzens, welches durch die Wunde noch obendrein in seiner Wirkung geschwächt war.

§ 166. Man muss eingestehen, dass das schnelle Aufhören der Blutbewegung in Fällen, wo man das Herz ausgeschnitten oder comprimirt hatte, einen directen Beweis für seine Unentbehrlichkeit beim Kreislauf nicht biete. Schneidet man das Herz aus, so tritt schnell Verblutung ein, und comprimirt man es, oder unterbindet man die Aorte, so verschliesst man dem Blute den einzigen Weg, welchen es für seinen kreisförmigen Umlauf benutzen kann. Die Verfechter der spezifischen Lebenskräfte haben nicht unterlassen, auf diese Mängel in der Beweisführung Gewicht zu legen. Um diesen Einwürfen zu begegnen, habe ich folgenden Versuch gemacht. Bei einem Frosche wurde ein Theil des Brustbeins weggenommen und das Herz frei gelegt. Dann

wurde derselbe in der Weise auf dem Objectträger eines Mikroskopes befestigt, dass man den Blutlauf in einer Schwimmhaut bequem betrachten konnte. Nach diesen Vorbereitungen und während ich selbst den Kreislauf im Auge behielt, liess ich das Thier elektrisiren, wozu der elektromagnetische Rotationsapparat benutzt wurde. Die Enden der Leitungsdräthe wurden an die Stellen des Schädels angelegt, wo die *nervi vagi* austraten, also die Nerven, welche, im Zustand elektrischer Erregung, den Herzschlag hemmen. In der That stand nach wenigen Umdrehungen des Rades das Herz still und keine volle Minute später auch das Blut.

Bald nach Oeffnung der Kette fing das Herz wieder an zu pulsiren und das Blut zu fliessen, aber wie oft auch der Versuch wiederholt wurde, immer gingen mehrere Herzschläge vorüber, ehe sich das Blut in der Schwimmhaut in Bewegung setzte.*)

Bei diesem Versuche sind zwei Verhältnisse besonders wichtig, einmal, dass er sich an demselben Thiere mit unverändertem Resultate mehrmals hinter einander wiederholen lässt, wodurch die Causalbeziehung zwischen Herzpuls und Blutbewegung über allen Zweifel erhoben wird, dann aber der Umstand, dass das Herz während seines Stillstands sich im Zustande allgemeiner Erweiterung befindet. Sowohl die Vorhöfe als auch der Ventrikel waren während der Reizperiode unverkennbar weiter als selbst während der Diastole unter normalen Verhältnissen, und folglich bot das Herz dem Durchtritt des Blutes eine offene und weite Pforte. Nichts würde die Blutkörperchen hindern, durch diese hindurch zu schwimmen, wenn sie eine mo-

*) Hiernach kann ich auf eine vereinzelte Beobachtung Czermacks sehr wenig Gewicht legen, welcher einmal gesehen zu haben versichert, dass bei einem aus dem Winterschlafe erwachenden Proteus der Blutlauf in den Capillaren früher hergestellt wurde als der Herzschlag. Czermack beobachtete das Herz nur durch die durchsichtigen Leibeswandungen; unter solchen Umständen konnten kleine und seltene Pulsationen (die wohl auch während des Winterschlafs nicht ganz fehlen möchten) leicht übersehen werden. (Med. Jahrb. des österr. Staats XV. S. 284.)

nadenartige Spontaneität besässen. Wenn nun demohngeachtet das Blut ruhte, so muss angenommen werden, dass ein bewegendes Moment neben der Herzkraft eben nicht vorhanden war. *)

§ 167. Es scheint angemessen, die Hauptresultate der vorausgeschickten weitläufigen Untersuchung in kurzen Sätzen zusammen zu drängen.

1) Das Herz ist ein Pumpwerk und besitzt als solches Kraft genug, um die Blutmasse im Kreislaufe durch das gesammte Gefässsystem zu treiben.

2) Es giebt neben dem Herzstoss keine Kraft, welche für sich allein den Kreislauf in höheren Thieren durchzuführen vermöchte.

3) Kräfte, welche die Leistungen der Herzpumpe in bemerkenswerther Weise unterstützten, sind nicht nachweisbar. Die Muskelbewegungen, besonders des Athmens, vermögen wohl etwas, aber doch nur wenig, weil das unterstützende Moment, welches sie bieten, durch ein gleichzeitig hemmendes, mit dem sie behaftet sind, zum grössten Theil anullirt wird.

4) Die Bewegungen des Blutes bei unthätigem Herzen sind einerseits nur Folgebewegungen, inwiefern die durch den Herzdruck veranlassten Spannungsdifferenzen der Gefässhöhle sich ins Gleichgewicht setzen, andererseits aber die Wirkungen einer langsamen Contractilität der Arterien oder regelwidriger und zufälliger Bedingungen, auf welche beim normalen Kreislauf nicht zu rechnen ist.

Diese Behauptungen hindern nicht einzugestehen, dass es neben dem Herzen noch andere bewegende Kräfte gebe, welche in den Vorgängen des Blutumlaufs vielleicht von grösster Bedeutung sind. Man täusche sich darüber nicht, was bis jetzt gesucht wurde. Offenbar nur jene mechanische Kraft, welche, nachdem sie ein Fluidum in ein System netzförmig verzweigter Kanäle gestossen, dasselbe auch trotz der vorhandenen Widerstände

*) Daher widerlegt dieser Versuch auch die Meinung M. Halls, dass die Arterien wohl auch ohne Hülfe des Herzens den Kreislauf zu Stande bringen würden, wenn es nur an Blut nicht fehlte. A. a. O. p. 93.

hindurch treibt. Diese Kraft leistet viel, aber nicht Alles. Sie treibt das Blut mit einem so hohen Drucke in die Arterienmündungen, dass es mit einer mässigen Geschwindigkeit aus den Venenenden wieder ausströmen und nun die Vorhöfe füllen muss. Dies allein ist die Aufgabe der Herzkraft. Wie sich das Blut in den vielen Bahnen, welche durch die Gefässverzweigung entstehen, vertheile, darauf hat das Herz nicht den mindesten Einfluss. Fliesst zu dem einen Organe mehr Blut als zu dem anderen, und zwar mehr Blut, als nach der normalen Weite, Länge, Form und anderweitigen Disposition seiner Gefässe erwartet werden musste, so tritt nun der Fall ein, wo nach neuen blutbewegenden Kräften zu suchen ist.

Solche Kräfte führen, wenn ich so sagen darf, im Feinen aus, was durch die Kraft des Herzens nur im Rohen skizzirt ist. Es soll bei der allgemeinen Blutströmung, d. h. bei diesem gleichmässigen Durchfliessen des Blutes durch ein für alle Mal vorhandene Kanäle, nicht sein Bewenden haben, sondern es sollen in der Bewegung der ernährenden Säfte hier und dort Modificationen eintreten, wie sie die zeitweiligen Bedürfnisse der Organe mit sich bringen. Nun können diese Bedürfnisse zwar Modificationen fordern, nicht aber machen. Die Modificationen der physiologischen Vorgänge beruhen auf Veränderungen der unterliegenden Bedingungen; es ist also die nächste Aufgabe der Wissenschaft, diese darzulegen. Bekennen wir im Voraus, dass unser Wissen in diesem Gebiete noch äusserst dürftig ist.

§ 168. Das Hauptmittel, welches der thierische Körper besitzt, die Vorgänge der Blutbewegung örtlich umzuwandeln, ist die Veränderlichkeit der Gefässweite. Die Arterien wenigstens besitzen ein lebendiges Contractionsvermögen und alle Gefässe sind mehr oder weniger elastisch. Nicht nur mit der zunehmenden und abnehmenden Thätigkeit der irritablen Fasern, sondern auch mit dem Zunehmen und Abnehmen der Werthe des Elasticitätsmodulus ändert sich die Weite der Gefässe. Nehmen wir an, der Elasticitätsmodulus sei (wie E. Weber für die Muskeln

erwiesen) von gewissen organischen Actionen in der Weise abhängig, dass eine Steigerung dieser ihn selbst schwächte, so besässe der Organismus das doppelte Vermögen, ein Gefäss zu verengern und auch zu erweitern. Die Verengerung würde auf directem Wege, durch die Thätigkeit der contractilen Fasern, erfolgen, die Erweiterung zwar auch in Folge eines activen Moments, aber doch nur indirecter Weise. Eine gewisse Action (vielleicht von den Nerven ausgehend) würde den Elasticitätscoëfficienten eines Gefässes verringern, und nun würde dieses, dem Blutdruck nachgebend, sich erweitern. Man unterlasse nicht zu bemerken, dass wenigstens ein Theil dieser Darstellung auf thatsächliche Geltung Anspruch machen darf. Hypothetisch ist nur, ob die Elasticität der Gefässwandungen, wie die der Muskeln, momentane Verminderungen erfahren könne; denn dass der Organismus Mittel besitze, sie auf dem Wege der Ernährung zu schwächen, ist vollkommen unzweifelhaft.

Wir haben nun die Folgen zu untersuchen, welche sich an die Veränderung der Gefässweiten anschliessen; ein Theil derselben liegt sehr nahe, andere weniger.

Natürlich muss die Verengerung der Gefässe eine Verminderung der Blutmenge des betreffenden Organs zur Folge haben, während Erweiterung das entgegengesetzte Verhältniss fordert, da Blutgefässe stets voll sein müssen. Dieser Lehrsatz würde von grösster Wichtigkeit sein, wenn erwiesen wäre, dass locale Anämien und Hyperhämien in allen Fällen auf vorausgegangenen Veränderungen der Gefässweiten beruhten, oder wenn wir wenigstens die Mittel besässen zu entscheiden, in welchen Fällen das Causalverhältniss sich derartig gestaltete.

Wie Hyperhämie die Wirkung örtlicher Ausdehnung der Gefässe sein kann, so könnte letztere die Folge jener sein, wenn das Blut aus irgend welchem Grunde mit vermehrter Kraft gegen ein Organ dränge. Bekanntlich sind die Pathologen immer sehr geneigt gewesen, die Hyperhämien der sogenannten Congestionen und Entzündungen von einem activen Andrange des Blutes zu den

Theilen abzuleiten. Für mich hat diese Auffassung wenig Befriedigendes, und auf keinen Fall würde ich annehmen, dass jener Blutandrang, welcher die Gefässe ausdehnte, in einer Spontaneität der Blutbewegung ihren Grund habe.

Sehr wahrscheinlicher Weise sind bei Weitem die meisten Hyperhämien und Anämien passive Folgen der veränderten Gefässweite, womit nicht geleugnet wird, dass die vorausgegangene Veränderung des Gefässdurchmessers ihrerseits auch Wirkung eines mechanischen Impulses und in diesem Bezuge ebenfalls passiver Art sein könne.

Man hat nämlich zu erwägen, dass jede locale Veränderung der Gefässdurchmesser, welche bei constanter Blutmenge eintritt, eine entgegengesetzte Veränderung in den Dimensionen des übrigen Gefässsystems oder wenigstens einer Partie desselben bedingen müsse. Wenn beispielsweise die Gefässe eines Gliedes sich contrahiren und einen Theil ihres Inhaltes entleeren, so kann das ausgetriebene Blut nur in einem anderen Theile der Gefässhöhle Raum finden, welcher, weil er schon voll war, sich erweitern muss, um den Zufluss aufzunehmen. Diese Erweiterung wäre also eine passive, aber immerhin nicht von dem Andrange des lebendigen Blutes abhängig, sondern von der Zusammenziehung der Gefässe, welche ihren Inhalt von sich stiessen.

§ 169. Es besteht also unvermeidlicher Weise ein Antagonismus zwischen verschiedenen Abschnitten der Gefässhöhle, in der Weise, dass veränderte Weite des einen entgegengesetzte Veränderungen in anderen hervorruft. Sobald dieser Antagonismus ins Spiel tritt, ändert sich nicht nur die Quantität des Blutes in den betreffenden Theilen, sondern auch seine Geschwindigkeit und in Folge dessen wieder sein Druck.

Bei Beurtheilung dieser Verhältnisse könnte leicht ein Irrthum auftauchen. Man könnte meinen, Contraction der Gefässe verschmälere das Strombett und bedinge demnach beschleunigte Strömung, aber die Verzweigung des Gefässsystems verlangt das Gegentheil. Es giebt keinen Gefässzweig im Körper, den man

nicht als Collateralast eines anderen betrachten könnte, und zur bequemeren Uebersicht stelle man sich vorläufig vor, es existirten im Organismus überhaupt nur zwei Collateralbahnen. In diesem Falle ist einleuchtend, dass die Contraction der einen eine Expansion der anderen veranlassen müsse, und dass die Verringerung des Durchmessers der ersteren ebenso gewiss eine Vermehrung der Widerstände mit sich bringen werde, als die Erweiterung der zweiten das Mass der Widerstände mindert. Hieraus ergiebt sich von selbst, dass die Strömung in der verengten Bahn eine Verlangsamung erfahren müsse.

Niemand wird übersehen, dass Lehrsätze wie die aufgestellten: erweiterte Gefässe beschleunigten den Blutfluss und contrahirte verlangsamten denselben, nur *caeteris paribus* gelten.*) Die Erweiterung des Gefässes an und für sich vermindert die Widerstände und beschleunigt den Kreislauf; wenn aber gleichzeitig mit der Erweiterung andere und mächtigere Bedingungen der Hemmung eintreten, z. B. Gerinnung des Faserstoffs u. dgl., so kann freilich Beschleunigung nicht eintreten. Wir abstrahiren vorläufig von solchen Nebenbedingungen gänzlich, was bei Beurtheilung des Nächstfolgenden nicht übersehen werden darf.

§ 170. Wie ich eben bemerkte, würde Erweiterung eines Gefässdistricts locale Hyperhämie mit beschleunigter Blutbewegung zur Folge haben, Verengerung dagegen Anämie mit langsamem Blutlauf. Mit Bezug auf den Causalzusammenhang würden sich aber folgende Formen unterscheiden lassen:

1. Hyperhämie.

a) Durch Ausdehnung der Gefässe primär erzeugt, nämlich durch plötzliche Verminderung des Elasticitätsmodulus an Ort und Stelle. Diese Form ist vor der Hand noch hypothetisch.**)

*) Ganz von selbst versteht sich, dass hier nicht von Dimensionsverhältnissen im Verlaufe eines und desselben Gefässes die Rede ist, in welchem Falle die Erweiterung vielmehr eine Verlangsamung der Bewegung bedingen würde. Es handelt sich gegenwärtig um Gefässbahnen, inwiefern sie Seitenarme anderer Bahnen abgeben.

**) Indess scheint plötzliches Sinken der elastischen Spannung unter den

Schamröthe und Erection der Genitalien könnten hierher gehören, auch wohl die Wirkung der *rubefacientia.*

b) Durch antagonistische Ausdehnung der Gefässe secundär erzeugt, nämlich primär durch Contraction irgend eines anderen Gefässabschnitts, dessen Blut von den mechanisch erweiterten Gefässen nun stellvertretend übernommen wird. Hierher gehören die Congestionen nach dem Kopfe bei kaltwerdenden Füssen.

2. Anämie.

a) Durch Zusammenziehung der contractilen Gefässfaser direct hervorgerufen, z. B. Anämie der Haut unter dem äusseren Einfluss der Kälte, vielleicht auch Erbleichen bei heftigen Gemüthsbewegungen.

b) Durch die Elasticität der Gefässe antagonistisch bedingt, bei Gefässerweiterung mit Congestionen in anderen Organen. Hiermit hängt der Nutzen der hautröthenden Mittel als *derivantia* zusammen.

Der Antagonismus, welcher im Bereiche des Gefässsystems nothwendig eintreten muss, wenn irgend ein Abschnitt desselben in seinen Dimensionen verändert wird, verlangt eigentlich, dass jede locale Veränderung der Art ihren Gegensatz im ganzen Umfange der übrigen Gefässhöhle geltend mache. Hätten wir, statt mit lebendigen Gefässen, mit todten Kanälen zu thun, und befände sich die Blutmasse in Ruhe, so müsste Contraction eines Gefässabschnitts und hierdurch bedingte Austreibung des Blutes nicht nur Ausdehnung, sondern auch gleichmässige Ausdehnung des gesammten übrigen Gefässsystems zur Folge haben. Da sich indess das Blut bewegt, so würde gleichmässige Ausdehnung nicht nur nicht gefordert, sondern vom rein physikalischen Standpunkte gar nicht zu erwarten sein, vielmehr müssten die antagonistischen Veränderungen der Gefässweiten je nach Massgabe ihrer Nähe am Punkte der Störung in höherem Grade

Vorgängen im Gefässsysteme allerdings eine Rolle zu spielen. Das plötzliche Eintreten copiöser Secretionen, besonders beim Thränenerguss, ist ohne ein plötzliches Erschlaffen der Gefässwandungen kaum denkbar.

sich geltend machen.*) Die Erfahrung lehrt indess, dass die antagonistischen Erscheinungen auch an dies Gesetz nicht gebunden sind. Sehr häufig treten die Gegensätze ganz local auf, wie beispielsweise die durch äussere Kälte bedingte Anämie der Füsse nicht selten locale Hyperhämie des Kopfes veranlasst.

Die wissenschaftliche Pathologie wird die vitalen Gesetze dieses Antagonismus näher zu prüfen haben; mit einiger Allgemeinheit lässt sich jetzt schon sagen, dass der schwache Theil im Körper das Auftreten antagonistischer Hyperhämien besonders begünstigt. Factisch ist, dass der schwache Theil, bei dem Einen die Brust, bei dem Anderen der Kopf, bei einem Dritten das Stimmorgan u. s. w., die Folgen von Erkältungen zunächst zu tragen hat, und in vielen Fällen mag dies so zusammenhängen, dass das aus dem erkälteten Theile ausgetriebene Blut sich congestiv im leidenden Organe sammele. Wo das Auge der schwache Theil ist, sieht man häufig, dass Erkältung irgend eines Körpertheiles eine Röthung der Conjunctiva nach sich zieht.

§ 171. Die veränderlichen Zustände der Gefässwandungen spielen also in der Blutbewegung eine grosse Rolle, inwiefern sie das Allgemeine des Vorgangs örtlich modificiren. Ein weiterer Anlass zu örtlichen Modificationen dürfte in den Absonderungen zu suchen sein. Die Secretion besteht in einer Ausscheidung von Stoffen aus dem Blute; eine solche Ausscheidung setzt die Gegenwart von Oeffnungen voraus, mögen diese auch nur durch die Zwischenräume der Gefässfasern gegeben sein. Um nun den Einfluss der Ausscheidung auf die Blutbewegung bequemer zu übersehen, stelle man sich vor, ein secernirendes Gefäss habe behufs der Ausscheidung statt vieler kleinen nur eine grössere Oeffnung, und zwar eine Oeffnung, durch welche genau so viel austritt, als durch alle wirklich vorhandenen kleinen zusammengenommen. Unter solchen Umständen kann Nie-

*) Das Begründete dieses Ausspruchs wird sich in einem späteren Abschnitte heraus stellen, in welchem ich die physikalischen Folgen der Störungen im Gefässsysteme behandle.

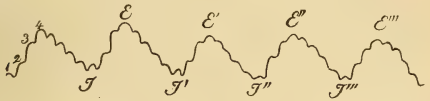
mand zweifeln, dass die Secretionsöffnung dem Austritt des Fluidums eine Bequemlichkeit bietet, die nicht unbenutzt bleiben kann. Durch die Oeffnung fliesst ein Theil der Flüssigkeit ab, der ohne die Oeffnung nicht abgeflossen wäre, es wird also an dem betreffenden Punkte auch mehr Blut gebraucht, und eben deshalb muss mehr nachdringen. Die Secretionsöffnung wirkt also mit einer Art Aspiration auf das zufliessende Blut und beschleunigt hiermit die arterielle Strömung zwischen dem Herzen und dem secernirenden Organe. Umgekehrt muss die Secretionsöffnung die Strömung auf der venösen Seite verlangsamen. Nämlich der zuführende Theil des Gefässes steht unter einer statischen Kraft, welche durch das Herz gegeben ist. Denken wir uns die Secretionsöffnung fehlend, so wird diese statische Kraft in ihrer Totalität benutzt, um das Blut durch die ganze Länge des Gefässes hindurch zu führen. Ist dagegen die Secretionsöffnung offen und gestattet einen Abfluss, so wird ein Theil der statischen Kraft für die Bewirkung dieses Abflusses verwendet und es bleibt nur ein mehr oder weniger grosser Bruchtheil derselben übrig, welcher das Blut nach der venösen Seite weiter schafft.

Aus dieser Darstellung ergiebt sich, dass eine reichliche Ausscheidung die arterielle Strömung des Organs auf Kosten der venösen begünstige. Sollte die Chirurgie nicht bestätigen, dass in der Nähe copiöser Eiterungen eine Hinneigung zu Venenstockung stattfinde?

§ 172. Wie die Veränderungen der Gefässdurchmesser Modificationen des Blutstroms im Raume herbeiführen, so veranlasst das Ein- und Ausathmen Modificationen in der Zeit. Im Vorhergehenden ist von dem Einflusse des Athmens schon beiläufig die Rede gewesen, aber nur inwiefern es sich um die Frage handelte, ob die Respirationsbewegungen geeignet wären, die Herzkraft zu unterstützen. Im Folgenden soll ermittelt werden, wie die vom Herzen ausgehende Blutbewegung sich unter dem Einflusse der Inspiration und Exspiration verschiedenartig gestalte.

Die zuverlässigsten Aufschlüsse hierüber verdanken wir den trefflichen Beobachtungen Ludwigs.*) Sein Kymographion verzeichnet Curven, deren wechselndes Steigen und Sinken über einer wagerechten Linie oder Abscisse dem wechselnden Grade des Blutdrucks im Verlaufe der Zeit entspricht. Da nun der Druck eine Function der Geschwindigkeit ist, so entsprechen jene Curven auch den Veränderungen der Stromschnelle; jede Hebung der Curven deutet auf Beschleunigung, jedes Sinken auf Verlangsamung der Bewegung.

Bringt man Ludwigs Druckmesser mit Arterien in Verbindung, so entstehen häufig Curven, welche über den Einfluss der Respiration ohne Weiteres Aufschluss geben. Eine Curve der Art ist die folgende, welche durch Einführung des Instrumentes in die *art. carotis* eines Hundes erhalten wurde.**)



Wir haben hier viele kleine Wellen, welche sich in den Conturen einiger wenigen grossen ausprägen; erstere sind die Folgen des Herzstosses, letztere die Wirkungen der Respiration. Die Höhenstände der grossen Wellen, $E\,E'\,E''\,E'''$, entsprechen dem Maximum der Exspiration, welche durch Verengerung des Brustkastens auf die grossen Arterienstämme drückt und hierdurch den Blutdruck auf seinen Culminationspunkt treibt. Die Tiefenstände, $J\,J'\,J''\,J'''$, entsprechen den Inspirationen, welche, als reines Gegentheil der vorigen, den Blutdruck auf sein Minimum zurückführen. Die kleinen Wellen, 1, 2, 3, 4, sind, wie schon bemerkt,

*) Beiträge zur Kenntniss des Einflusses der Respirationsbewegungen auf den Blutlauf im Aortensysteme. Müllers Archiv, 1847. p. 242.

**) Leider ist die Abbildung nicht ganz treu. Hin und wieder nähert sich die Curve zu sehr der senkrechten Richtung.

die Wirkungen des Herzstosses; ihr aufsteigender Schenkel entspricht der Systole, ihr absteigender der Diastole des Herzens.

Bisweilen verschwindet der Einfluss der Respiration selbst in den grösseren Arterien gänzlich, wie Ludwigs Figur 8 zeigt, wonach im Voraus zu erwarten, dass Fälle vorkommen werden, wo die Art des Einflusses Zweifel erregt. Dies ist namentlich dann der Fall, wenn die Zahl der Pulse und Athemzüge in einer gegebenen Zeit ungefähr eine gleiche ist, oder wenn die Grösse der Pulswellen und Respirationswellen sich wenig unterscheidet und überdies Unregelmässigkeiten in Bezug auf die Frequenz beider Functionen vorkommen.

In solchen Fällen, welche sehr häufig eintreten, giebt die Curve gar keinen Aufschluss darüber, was in dem Gange der Linie die Bewegung des Herzens und was die des Brustkastens vermittele. Ludwig kam daher auf den glücklichen Gedanken, sein Instrument so einzurichten, dass zwei Curven gleichzeitig gezogen wurden, deren eine die Oscillationen des Blutes, die andere den Wechsel des Respirationsdrucks verzeichnete. Um den Druck in dem Pleuralsacke zu bestimmen, bediente er sich eines Röhrchens, welches luftdicht in die Brustwandung eingeführt wurde, nachdem er ein Bläschen an das Ende derselben gebunden, welches in die Brusthöhle zu liegen kam. Hierauf füllte er Röhre und Bläschen mit Wasser und brachte ersteres mit dem einen seiner Druckmesser in Verbindung.*)

Die mit Hülfe des letzteren Apparates gewonnene Pleuralcurve zeigte nun ebenfalls Wellen, deren Aufsteigen, wie sich von selbst versteht, mit der Exspiration zusammenfiel. Indem vollkommen gleichzeitig eine Curve des Blutdrucks und eine zweite des Re-

*) Ich will beiläufig bemerken, dass diese Methode, den Respirationsdruck zu bestimmen, wohl einer wesentlichen Verbesserung fähig sein dürfte. Ich würde die Luftröhre des Thieres durchschneiden und in dieselbe eine ⊤förmige Kanüle einbinden, die dann mit dem Kymographion in Verbindung zu setzen wäre.

spirationsdrucks gezogen wurde, war Gelegenheit gegeben, den Einfluss des letzteren auf den ersteren zu beurtheilen.

Man hätte nun erwarten können, dass die Steigerung des Respirationsdrucks beim Ausathmen immer mit Steigerung des Blutdrucks zusammenfallen werde, wie denn auch Magendie gelehrt hatte, dass die Exspiration den arteriellen Blutstrom fördere; aber Ludwigs Curven beweisen unwidersprechlich, dass dies nicht immer der Fall sei. Vielmehr correspondirt nicht selten dem Steigen der Pleuralcurven ein gleichzeitiges Sinken der Pulscurve, was mit Bezug auf das Verhältniss zwischen Druck und Geschwindigkeit beweist, dass die Schnelligkeit der Blutströmung im Zeitraume der Exspiration auch abnehmen könne.

Bei näherer Ueberlegung ist eine derartige Gestaltung der Dinge nicht auffällig. Der Blutstrom steht unter dem Einfluss zweier fördernder und zweier hemmender Momente, welche mit Bezug auf Zeitdauer und Intensität ihres Wirkens sehr verschiedene Werthe haben können. Die fördernden Momente sind die Systole des Herzens und die Verengerung des Brustkastens beim Ausathmen; die hemmenden sind die Diastole und die Inspiration. Die Ordinaten der Blutcurve werden nun davon abhängen, wie jene Momente sich combiniren und welche Werthe die gleichzeitig auftretenden Kräfte mitbringen. Es liegt am Tage, dass hiermit eine grosse Mannigfaltigkeit von Fällen gegeben ist. Die Pulscurve wird gewaltig steigen, wenn die beiden fördernden Kräfte, Systole und Ausathmung, zusammenfallen; sie wird tief herabsinken, wenn zufällig Inspiration und Diastole zusammentreffen; sie wird sich fast gar nicht ändern, wenn die entgegengesetzten Momente, z. B. Systole und Inspiration, mit ungefähr gleicher Kraft sich entgegen arbeiten, und endlich kann sogar vorkommen, dass trotz der Exspiration die Blutcurve um ein Ansehnliches sinkt, wenn die Diastole sehr lange dauert und das Ausathmen sehr kraftlos ist.

Je mehr Pulse auf die Zeit einer Athmung fallen und je kräftiger letztere ist, um so entschiedener spricht sich der Einfluss

aus, welchen die Respiration auf die Blutbewegung ausübt. In der Regel erhebt sich dann die Pulscurve während der Exspiration um ein Beträchtliches. Es bedarf der Bemerkung kaum, dass in grosser Entfernung vom Herzen oder in den kleineren Arterien dieser Einfluss abnimmt und endlich ganz schwindet.

§ 173. Der Einfluss des Athmens auf den venösen Blutstrom lässt sich unter günstigen Umständen am lebenden Menschen beobachten. Bei Personen von zarter Haut bemerkt man nicht selten, dass die *vena jugularis* nahe am Schlüsselbeine abwechselnd anschwillt und zusammenfällt, und dass Ersteres vom Ausathmen, Letzteres vom Einathmen abhängt. Hiermit ist die Aspiration des Venenblutes beim Einathmen hinreichend erwiesen. In einiger Entfernung vom Schlüsselbeine bewegt sich die Drosselvene nur wenig, und in den Venen am Schlafe ist eine Oscillation durchaus nicht merklich, woraus sich ergiebt, dass der Einfluss der Aspiration abwärts vom Brustkasten abnimmt, wie auch aus physikalischen Gründen erwartet werden musste.

Bei Säugethieren kann man diese Erscheinungen noch auffallender haben, wenn man die Drosselvene in einer grösseren Strecke freilegt. Man bemerkt dann, dass die Ader in der Nähe des Brustkastens nicht nur bei jedem Einathmen an Umfang abnimmt, sondern in dem Grade zusammenfällt, dass ihre Wandungen sich gegen einander legen und das Lumen der Gefässhöhle vollständig verschliessen. Man ist indess nicht berechtigt anzunehmen, dass im unverletzten Thiere die Wirkung der Aspiration ebenso heftig sein sollte. Durch das Freilegen der Vene werden die zarten Wandungen derselben dem Luftdrucke in erhöhtem Masse Preis gegeben; unvermeidlicher Weise müssen sie nach Entfernung der Haut und anderer minder nachgiebiger Theile unter Einwirkung eines Drucks von aussen leichter zusammenfallen.

Poisseuille, Magendie und Mogk haben sich bei diesen einfachen Erfahrungen nicht begnügt, sondern haben durch Bestimmung der Druckdifferenzen beim Ein- und Ausathmen den

Einfluss der Respiration durch Zahlenwerthe begründen wollen. Ich darf nicht unbemerkt lassen, dass jenen mit grosser Anerkennung aufgenommenen Versuchen ein wesentliches Missverständniss zum Grunde liege.

In allen jenen Versuchen wurde der Hämodynamometer in Venen eingeführt, um die Grösse des Blutdrucks während der Athembewegungen zu messen. Offenbar setzte man voraus, dass die gefundenen Druckdifferenzen den Widerstandsunterschieden gleich kämen, welche während des Aus- und Einathmens im unverletzten Thiere sich geltend machten. Wäre diese Voraussetzung richtig, so würde durch das Experiment die Kraft der Aspiration und Repulsion direct gemessen, allein es wird sich finden, dass jene Voraussetzung nicht zulässig ist.

Natürlich ist die Wirkung der Aspiration von dem Grade des Widerstandes abhängig, welchen das angesaugte Fluidum zu überwinden hat. So wird Niemand zweifeln, dass beim Einathmen ein grösseres Volumen Luft als Blut von den Lungen aspirirt werde, eben deshalb, weil das Einströmen der ersteren mit grösserer Leichtigkeit geschieht als das des letzteren. Gesetzt nun, der Widerstand, welchen das Fluidum im Hämodynamometer findet, wäre geringer als derjenige, welcher sich dem Blute im Verlaufe der Venen darbietet, so würde von dem flüssigen Inhalte des Instrumentes auch mehr aspirirt werden müssen als von dem Blute der unverletzten Venen. Unter solchen Umständen versteht sich von selbst, dass das Quecksilber im Druckmesser während der Inspiration unverhältnissmässig tief sinke, und dass die Tiefe dieses Standes keineswegs das Mass der Kraft sei, mit welcher das Blut unter normalen Verhältnissen aspirirt wird.

Aus entsprechenden Gründen kann der Hämodynamometer den Blutdruck während der Exspiration zu hoch angeben. Das durch die Verengerung des Brustkastens zurückgedrängte Blut hat zwei Wege vor sich, auf welchen es entweichen kann, einerseits den Weg durch die Venen gegen die Haargefässe, anderer-

seits den Kanal des Druckmessers. Das Blut muss beide Wege einschlagen, aber die Bewegung hat da den meisten Erfolg, wo sich die wenigsten Widerstände darbieten. Wenn nun, wie oben angenommen wurde, die geringeren Widerstände auf Seiten des Druckmessers liegen, so bewegt sich das Fluidum in diesem rascher und erhebt sich zu einer Höhe, welche über den normalen Druckwerth des Blutes hinausreicht. *)

Obgleich die Richtigkeit des Gesagten aus theoretischen Gründen ganz unzweifelhaft ist, so will ich doch auf eine bestätigende Erfahrung aufmerksam machen, welche jedem Experimentator hinreichend bekannt sein wird. Es sind nämlich die Differenzen des Blutdrucks abhängig von der Beschaffenheit des Manometers, indem das Quecksilber während der Exspiration um so weniger hoch steigt und während der Inspiration um so weniger tief sinkt, je weiter die Glasröhre des Druckmessers und je enger die Kanüle ist, durch welche derselbe mit dem Blutgefässe verbunden wird. Man kann sogar durch eine auffallende Weite der Glasröhre und eine ausserordentliche Verengerung der Kanüle die von den Athembewegungen und den Pulsen abhängigen Oscillationen des Quecksilbers gänzlich beseitigen; dasselbe verbleibt dann, ohne zu schwanken, auf dem Werthe des Mitteldrucks.

Hiernach ist einleuchtend, dass bei Hämodynamometer-Beobachtungen nur der aus den Höhen- und Tiefenständen des Quecksilbers berechnete mittlere Blutdruck von physikalischer Bedeutung ist, und dass die Werthe der Höhen- und Tiefenstände selbst vielmehr von den Zufälligkeiten der experimentalen Eingriffe als von der Gesetzmässigkeit der hämodynamischen Prozesse abhängen. **)

*) Man schliesse hieraus nicht etwa, dass der Hämodynamometer ein unbrauchbares Instrument beim Messen des Blutdrucks sei. Die Fehler des *plus* und *minus*, welche während der Aus- und Einathmung vorkommen, compensiren sich, und der Mitteldruck, auf dessen Bestimmung es ankommt, wird nicht gefälscht.

**) Ich habe mir in der Darstellung dieser Verhältnisse eine gewisse Ausführlichkeit erlaubt, weil sie für das Verständniss des Hämodynamometers

Mit Berücksichtigung dieser Verhältnisse müssen die Versuche beurtheilt werden, welche angestellt wurden, um den Einfluss der Respirationsbewegungen auf den Blutlauf zu ermitteln. Poisseuille führte ein elastisches Röhrchen in die geöffnete Drosselvene so tief ein, dass das Ende derselben im Brustkasten nahe am Herzen zu liegen kam.*) Dieses Röhrchen wurde mit dem Hämodynamometer verbunden, welcher mit einer Natronlösung gefüllt war, und diese Lösung schwankte in der Weise, dass sie bei jeder Inspiration unter den Nullpunkt herabsank, dagegen bei jeder Exspiration wieder über denselben emporstieg. Bezeichnen wir die Höhen, bis zu welchen das Natronwasser stieg, mit + Millimeter, und die Tiefe, bis zu welcher es unter Null sank, mit — Mill., so ergab sich in einer Beobachtungsreihe Folgendes:

Blutdruck in der *v. cava superior* eines Hundes.

während der Inspiration	während der Exspiration	Bemerkungen
— 90 Mill.	+ 85 Mill.	
— 70 »	+ 60 »	
— 150 »	+ 120 »	durch körperlichen Schmerz verstärktes Athmen.
— 250 »	+ 140 »	
— 240 »	+ 155 »	
— 245 »	+ 140 »	
— 90 »	+ 86 »	Rückkehr des normalen Athmens.
— 70 »	+ 65 »	
— 85 »	+ 60 »	

Das Merkwürdige an dieser Beobachtungsreihe ist der Umstand, dass der aus den Höhen- und Tiefenständen berechnete Mitteldruck einen negativen Werth hat. Eine ganz ähnliche Erfahrung habe ich in Verbindung mit Ludwig gemacht. Nach dem

überhaupt von Wichtigkeit sind. Selbst einige Männer vom Fache sind sich über die Bedeutung der Quecksilberoscillationen nicht klar geworden.

*) *Magendie, Journal de physiol. X.* p. 277.

Vorgange Poisseuilles hatten wir ein biegsames Röhrchen in der Drosselvene bis nahe an die Vorkammer eingeschoben und mit dem Druckmesser in Verbindung gesetzt, nur hatten wir, um die Beobachtung genauer zu machen, das Kymographion in Anwendung gebracht. Die merkwürdige Curve ergab, dass der Druck constant negativ war.

Ein negativer Druck in einem Blutgefässe heisst aber nichts Anderes, als dass der Druck des Blutes von innen geringer ist als der Druck der Atmosphäre von aussen; natürlich muss die ganze Grösse dieses negativen Drucks auf die Wirkung der Aspiration bezogen werden.*)

Mogk behauptet, auch in Venen, die ausserhalb des Brustkastens gelegen waren, negative Druckwerthe erhalten zu haben.**) So soll das mit Natronwasser gefüllte Manometer in der *v. cruralis* eines Hundes auf — 89 Millimeter, in der *jugularis* auf — 22 gesunken sein. Diese Angaben beruhen sicherlich auf einem Irrthume; weder Poisseuille noch ich erhielten in den vom Herzen entfernter liegenden Venen jemals negative Druckwerthe. Uebrigens ist Mogk mit sich selbst im Widerspruche. Die eben erwähnten Resultate waren mit Benutzung des Spenglerschen Instrumentes gewonnen, welches den reinen Seitendruck oder w misst (§ 79). In mehreren anderen Versuchsreihen wurde dagegen Mogks Instrument benutzt, welches den Werth des gesammten statischen Drucks oder $H = w + \frac{v^2}{4g}$ angiebt (§ 78). Wären die Beobachtungen richtig, so müssten sich die nach der

*) In den vorerwähnten Versuchen dürfte der negative Mitteldruck das ziemlich genaue Mass der Aspirationskraft sein. Der Manometer ist nämlich am äussersten Ende des Venensystems eingeführt worden, an einem Punkte, wo nach hydrodynamischen Grundsätzen ein Blutdruck = 0 erwartet werden musste, weil die Hindernisse, welche dem Blutstrome entgegenstanden, bereits sämmtlich überwunden sind. Finden wir nun an diesem Punkte einen Druck von negativem Werthe, so brauchen wir nur die Vorzeichen des letzteren zu verwandeln, um den Ausdruck der statischen Kraft zu finden, mit welcher die Aspiration dem Venenstrome zu Hülfe kommt.

**) A. a. O. pag. 32.

einen und nach der anderen Methode erhaltenen Druckhöhen um den Werth $\frac{v^2}{4g}$, oder um die Geschwindigkeitshöhe, unterscheiden. Dies ist nicht der Fall, und die zwischen beiden Beobachtungsreihen befindliche Druckdifferenz ist so ungeheuer, dass die Annahme grober Beobachtungsfehler ganz unabweislich ist. Ich will dies an einem Beispiele nachweisen.

Mogk erhielt mit seinem Instrumente in der *vena cruralis* eines Hundes einen Druck von + 225 Mm., mit dem Spenglerschen dagegen einen Druck von — 89 Mm. Wenn nun bei einer Druckhöhe von + 225 Mm. kein Seitendruck stattgefunden hätte, wie aus dem Versuche mit dem Spenglerschen Instrumente gefolgert werden müsste, so wäre dieser ganze Druck auf die Production der Stromschnelle verwendet worden. Eine Druckhöhe von 225 Mill. bedingt aber eine Geschwindigkeit von 2027,8 Mill. So gross also müsste nach Mogk die Geschwindigkeit des Blutes in der Schenkelvene sein, und zwar abstrahirt von dem der Bewegung günstigen Einflusse einer Aspiration, welche einen negativen Druck = — 89 veranlasst!

§ 174. Zu den Kräften, welche einen localen Einfluss auf die Blutbewegung ausüben, müssen auch die gezählt werden, welche den Adhäsionscoëfficienten des Blutes in gesonderten Abschnitten des Gefässsystems umändern. Wir wissen von solchen Kräften nur sehr wenig.

Natürlich muss der Werth des Adhäsionscoëfficienten eben sowohl durch die Beschaffenheit des Blutes als durch die der Gefässwandungen bestimmt werden; indess liegt am Tage, dass auf die Veränderungen, welche von Seiten des Blutes erfolgen, hier wenig ankommen könne. Jede Umänderung des Adhäsionsverhältnisses, welche nur vom Blute ausginge, würde sich nicht auf örtliche Folgen beschränken, sondern ihre Wirkungen im ganzen Umfange des Gefässsystems geltend machen, sie würde also die Erscheinungen der ungleichen Blutvertheilung, um deren Ursachen es sich gegenwärtig handelt, gar nicht vermitteln können.

Es ist bekannt, dass die meisten Reize, wenn sie nur hinreichend kräftig auf die Gewebe wirken, zu örtlicher Blutstockung Anlass geben können. Dergleichen Stockungen kommen unter Umständen vor, wo an eine primäre Gerinnung des Blutes durchaus nicht zu denken ist, und wo eine andere Annahme kaum übrig bleibt als die, dass die Adhäsion zwischen Blut und Gewebe durch Umstimmung des letzteren eine Vermehrung erfahren habe. Hierher würde ich nicht nur die Fälle rechnen, wo der Stillstand des Blutes in Folge mechanischer Reizung und nach Benetzung der Gewebe mit Kochsalz oder Kalilösung eintritt, sondern auch diejenigen, wo das Reizmittel zwar eine Gerinnung des Blutes erzeugen kann, aber factisch nicht augenblicklich erzeugt hat. So kann die Stockung des Blutes nach Verbrennungen offenbar nicht von der Gerinnung des Eiweisses durch die Hitze abgeleitet werden, wenn sie nicht während der Einwirkung dieser, sondern erst nachträglich zu Stande kommt.

Es ist sehr bezeichnend für die Vorurtheile einer gewissen Schule, dass sie die Erscheinungen der Blutstockung unter diejenigen aufnahmen, aus welchen das Dasein von Kräften folgen sollte, welche den ungenügenden Herzstoss ergänzten. Fälle wie die eben erörterten können nur auf hemmende Momente bezogen werden.

Cap. XIII.

Von der Herzthätigkeit.

§ 175. Die Contraction des Herzens beginnt in den grossen Venenstämmen, geht von diesen auf die Vorhöfe über und schliesst mit der Verengerung der Kammern. Ist ein *bulbus aortae* vorhanden, so erfolgt die Zusammenziehung desselben im normalen

Zustande stets nach dem Pulsiren der letzteren. Eine Pause zwischen der Zusammenziehung der Vorhöfe und der Kammern findet im lebenskräftigen Organe nie statt. Die Contraction der rechten und linken Herzhälfte erfolgt gleichzeitig, was durch den Verlauf der Muskelbündel nicht unbedingt gefordert wird, da bei frisch getödteten Thieren Fälle vorkommen, wo der rechte Vorhof öfter pulsirt als der linke. *)

Aus dem Angeführten ergiebt sich, dass die verschiedenen Abtheilungen des Herzens in der Zeitfolge nach einander ihre Bewegungen ausführen, und dass für diese Bewegungen eine gesetzliche Ordnung besteht.

Während der Systole der Kammern verkürzen sich, wie alle übrigen Muskelbündel, so auch die Papillarmuskeln. Eine Folge dieser Verkürzung ist eine Anspannung der sehnigen Fäden, welche die frei vorspringenden Enden der erwähnten Muskeln mit den Vorhofklappen verbinden. Ohne diese Vorkehrung würden die Sehnen während der Verengerung der Herzkammern erschlaffen und unfähig werden, die Klappen in der Lage zu erhalten, welche sie haben müssen, um dem Andrange des Blutes gegen die venösen Oeffnungen zu widerstehen und letztere schliessen zu können.

Seit Harvey ist die Ansicht vorherrschend, dass die Zusammenziehung des Herzens in allen Dimensionen erfolge. Indess scheinen Ludwigs sorgfältige Messungen am Katzenherzen zu beweisen, was schon Arnold behauptet hatte, dass die Dimensionen der Tiefe, d. h. der Durchmesser von der Wirbelsäule gegen das Brustbein, während der Systole zunehmen. Eine feste Bestimmung dieser Verhältnisse wird dadurch schwierig, dass das Herz im Zustande der Erschlaffung weder auf irgend eine Seite gelegt, noch frei aufgehangen werden kann, ohne jene Formveränderungen zu erleiden, welche in sehr nachgiebigen Theilen die Schwere der Masse mit sich bringt. Die Messungen Ludwigs ver-

*) Haller, *Elementa phys. I.*

dienen nun gerade deshalb Zutrauen, weil hierauf Rücksicht genommen wurde. Uebrigens erhielt Oesterreicher ein ganz ähnliches Resultat, denn als er ein ausgeschnittenes und auf den Tisch gelegtes Froschherz mit einem Glasplättchen bedeckte, zeigte sich, dass bei jeder Systole das Plättchen emporstieg.

Während die Gestalt des erschlafften Herzens eine wandelbare ist, scheint die des contrahirten Organs eine vollkommen beständige zu sein. Das Katzenherz bildet im Zeitraum der Systole einen stumpfen Kegel, dessen Längenaxe senkrecht auf der kreisförmigen Basis steht. Es käme nun darauf an, die normale Gestalt in der Periode der Diastole zu kennen. Den Messungen Ludwigs zu Folge würde die Basis des Katzenherzens im Zustande der Ruhe die Form einer Ellipse haben, deren kleine Axe kleiner ist als der Durchmesser des Kreises, welchen die Herzbasis im Acte der Systole bildet. Dass nun beim Menschen ähnliche Verhältnisse stattfinden, wird dadurch glaublich, dass die Basis des todten Herzens ebenfalls eine Ellipse bildet. Ihre kleine Axe verhielt sich zur grossen in einem Falle wie 66 : 97, in einem zweiten wie 71 : 96 Mill. Diese Angaben verdienen aber um so mehr Zutrauen, als der sorgfältige Krause Aehnliches berichtet. Nach Letzterem beträgt der Breitendurchmesser im Mittel 4 Zoll, der Durchmesser der Tiefe, von vorn nach hinten gerechnet, nur $3\frac{1}{4}''$.*)

§ 176. Ungefähr zwischen dem fünften und sechsten Rippenknorpel, etwas nach unten und innen von der linken Brustwarze, fühlt man bei den meisten Menschen den Herzschlag, und bei nicht wenigen wird eine pulsirende Bewegung selbst mit den Augen wahrgenommen. Dieser fühlbare Schlag fällt mit dem Pulse und folglich mit der Systole zusammen, eine Thatsache, die Burdach verkannte, wenn er die Ursache des Phänomens in dem Umstande suchte, dass das Herz im Momente der Expansion an das Brustbein anstosse. Ist Ludwigs Angabe richtig, dass der Tie-

*) Handbuch der menschlichen Anatomie, I. Bd. 2. Theil. S. 783.

fendurchmesser des Herzens während der Systole wachse, so könnte eben hierin die Erklärung des Herzstosses zu liegen scheinen. Indess entspricht die Stelle, wo man letzteren fühlt, mehr der Lage der Herzspitze und begünstigt die Ansicht derer, welche annehmen, dass diese an die Brustwand anstosse. Hiermit entsteht dann die schwierige Frage, durch welche Umstände ein solches Anstossen während der Systole bedingt werde. Es ist bekannt, dass Physiologen und Aerzte diese Frage in sehr verschiedener Weise beantwortet haben, und ich halte es für überflüssig, die schon so oft und ausführlich beleuchteten Theorien einer nochmaligen Kritik zu unterwerfen. Zu bemerken wäre nur, dass Ludwig zu den schon vorhandenen Erklärungen noch eine neue hinzugefügt hat, die, wie mir scheint, mehr für sich hat als alle früheren. Ich habe schon angeführt, dass das Herz in der Systole einen Kegel darstellt, dessen Axe senkrecht auf der Basis des Herzens steht. Da die Basis nach oben und hinten gerichtet ist, so kann angenommen werden, dass im erschlafften Herzen die Axe mit der Basis einen Winkel bilde, welcher nach unten und hinten kleiner, dagegen nach vorn und oben grösser als 90^0 sei. Soll nun die Axe in der Systole senkrecht auf die Basis zu stehen kommen, so muss das Herz eine Hebelbewegung ausführen, welche die Spitze gegen die Brustwand schleudert.

§ 177. Die Bewegung des Herzens giebt zur Entstehung gewisser Töne Anlass, welche man wahrnimmt, wenn man das Ohr gegen die Brust hält. Auf jeden fühlbaren Herzschlag fallen zwei Töne, und das zwischen beiden liegende Intervall ist etwas kürzer als dasjenige, welches zwischen dem zweiten Tone eines ersten Pulses und dem ersten Tone eines zweiten Pulses befindlich ist. In dieser Beziehung hat man das Recht, von einem ersten und zweiten Tone zu sprechen.

Da ich über die Herztöne nichts Neues zu sagen habe, so beschränke ich mich darauf, in grösster Kürze meine Meinung über deren Ursache auszusprechen. Der erste Herzton fällt mit dem fühlbaren Herzschlage und folglich mit der Systole zusammen.

Er ist theilweise eben Wirkung dieses Schlages, obschon noch andere Ursachen mitwirken müssen. Auch nach Wegnahme der vorderen Brustwand bleibt der erste Ton noch eine Zeit lang wahrnehmbar, woran der gewaltsame Schluss der Vorhofklappen jeden Falls den meisten Antheil hat, auch wenn das Muskelgeräusch der Systole mit in Betracht kommen sollte, was meiner Meinung nach von sehr untergeordnetem Einfluss sein dürfte.

Der zweite Ton hängt hauptsächlich von dem plötzlichen Schlusse der Semilunarklappen ab, welcher in dem Momente erfolgen muss, wo die Contraction der Ventrikel aufhört und die der grossen Arterienstämme beginnt. Für diese Auffassung spricht erstens der Umstand, dass der zweite Herzton unmittelbar auf den folgt, welcher mit der Systole des Ventrikels zusammenfällt, und zweitens die Erfahrung, dass bei Insufficienz der Semilunarklappen der zweite Herzton wegfällt. Aerzte, welche im Gebrauche des Stethoskops hinreichend geübt sind, diagnosticiren organische Fehler der Semilunarklappen aus der spezifischen Beschaffenheit des zweiten Tones mit Sicherheit.

Indem nun erwiesen wurde, dass der zweite Herzton ein Klappengeräusch ist, lässt sich vernünftiger Weise nicht zweifeln, dass die Klappen auch an dem ersten Tone einen wesentlichen Antheil haben. Offenbar sind die Bedingungen, unter welchen sich die Vorhofsklappen beim Beginn der Herzcontraction befinden, denjenigen der halbmondförmigen Klappen, beim Beginn der Arteriencontraction, vollkommen entsprechend.

Hieraus ergiebt sich, dass die beiden Herztöne die Grenzpunkte für die Dauer der Systole abgeben. Der erste Herzton erfolgt, wenn die Vorhofsklappen sich schliessen, d. h. unmittelbar nachdem die Systole begonnen, und der zweite Herzton erfolgt, wenn die Semilunarklappen zufallen, d. h. unmittelbar nach dem Schlusse der Systole.

§ 178. Wenn das Zeitintervall zwischen dem ersten und zweiten Herztone die Dauer der Systole bezeichnet, so muss durch das Intervall zwischen dem zweiten Tone eines ersten

Pulses und dem ersten Tone eines zweiten Pulses der Zeitraum der Diastole gegeben sein. Letztere dauert ja eben von dem Schlusse der einen Systole bis zum Anfange der folgenden.

Hierauf fussend habe ich Versuche gemacht, um die Frage zu entscheiden, wie sich die Dauer der Systole zu der der Diastole verhalte. Ich verschaffte mir zwei Halbsecunden-Pendel, deren Schwingungsdauer durch ein verschiebbares Gewicht an der Pendelstange ein wenig verkürzt und verlängert werden konnte. Während ich nun, mit dem Kopf gegen die Brust einer ruhig sitzenden Person gelehnt, auf die Herztöne achtete, stellte ich das erste Pendel so, dass seine Schwingungsdauer dem Intervalle zwischen dem ersten und zweiten Herztone gleich kam, das zweite dagegen so, dass die Schwingungsdauer mit dem Zeitraume zwischen einem zweiten und einem nächstfolgenden ersten Herztone zusammenfiel. Nunmehr gab das eine Pendel die Dauer der Systole, das andere die Dauer der Diastole, vorausgesetzt natürlich, dass die Beobachtung Zutrauen verdiente. Um also die Zuverlässigkeit der eingeschlagenen Methode zu prüfen, waren Gegenversuche nöthig. Da in den Zeitraum eines Pulses eine Systole und eine Diastole fällt, so ist

$$P = S + D$$

wo P die Dauer des Pulses, S die Dauer der Systole und D die Dauer der Diastole bedeutet. Ich bestimmte also an derselben Person, an welcher ich die Messungen angestellt hatte, auch die Dauer eines Pulses und verglich diese mit der Summe der Werthe S und D, indem von dem Grade der Uebereinstimmung beider der Grad der Zuverlässigkeit meines Verfahrens abhing.

Die gewonnenen Zahlenwerthe ergaben ein sehr befriedigendes Resultat. Nie differirte die Summe des Werthes $S + D$ um mehr als $\frac{2}{25}$ Secunden von dem der Pulsdauer; in zwei Beobachtungen, unter 9, war sogar jene Summe und die Pulsdauer ein Mal um weniger als $\frac{1}{100}''$ verschieden, ein anderes Mal absolut gleich.

Wenn nun die Genauigkeit der Beobachtungsmethode hin-

reichend erwiesen ist, wird auch das Resultat meiner Untersuchungen kaum angreifbar sein. Ich habe gefunden, dass die Dauer der Systole und die der Diastole sich wenig unterscheiden, indem im Mittel von 9 Beobachtungen sich jene zu dieser wie 96 : 100 verhielt.

Als Beispiel diene folgende Beobachtung, in welcher ein mittlerer Grad von Genauigkeit erreicht wurde:

N. N., 34 Jahre alt, 84 Pulse in einer Minute.

Dauer des ersten Intervalls	$= S =$	0,3750″
Dauer des zweiten Intervalls	$= D =$	0,3798″
Summe $S + D =$		0,7548″
Dauer eines Pulses	$=$	0,7140″
Differenz	$=$	$+$ 0,0408″

Verhältniss der Systole zur Diastole = 99 : 100.

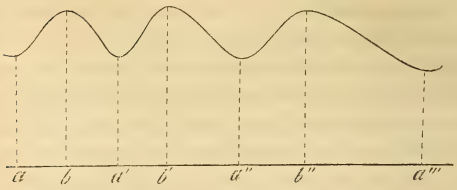
Ich erwarte hier nicht den Einwurf, man höre ja, dass das Intervall zwischen dem ersten und zweiten Tone viel kürzer sei als die nun folgende Pause, denn meine Beobachtungen beweisen eben, dass man dies nicht höre, da ja die Pendel nach den auscultirten Tönen regulirt werden. Man kann nur fragen, wie es komme, dass das durch keine Pendelbeobachtungen controlirte Ohr sich über die erwähnten Intervallen täusche und eine Empfindung habe, als lägen die beiden Herztöne sich verhältnissmässig näher, als sie sich wirklich liegen. Nach Wilhelm Weber könnte dies schon durch die Ungleichheit der beiden Töne bedingt sein, inwiefern der eine lauter ist als der andere. Wichtiger noch scheint mir der Umstand, dass der erste Ton kein plötzlicher, schnell vorübergehender Laut ist, wie der ihm folgende zweite Herzton, sondern ein Ton mit einem Nachhalle. In Folge dieses Umstandes verbindet sich der erste Ton einigermassen mit dem zweiten, und der zwischen beiden befindliche Zeitraum scheint kürzer. Bei den oben beschriebenen Pendelbeobachtungen entgeht man dieser Täuschung, indem man beim Reguliren des Pendels unwillkürlich das erste Eintreten der

Töne berücksichtigt und also beim ersten Herzgeräusche von jenem nachhaltigen Rauschen ganz absieht. Meiner Meinung nach liegt eben in diesem Umstande die Möglichkeit, die Dauer der Systole durch Auscultation zu bestimmen. Nicht der ganze erste Herzton in seiner anhaltenden Dauer entspricht dem Geräusche der sich schliessenden Klappen, sondern das erste Moment desselben, auf welchem für das Gehörorgan ein merklicher Accent liegt. *)

Eine zweite Methode, das Verhältniss der Systole zur Diastole zu bestimmen, beruht auf der Benutzung des Kymographion. Wenn man eine Arterie mit diesem Instrumente in Verbindung bringt und eine Curve zieht, so erhebt sich diese bei jeder Systole und sinkt bei jeder Diastole. Wir werden der Wahrheit sehr nahe kommen, wenn wir annehmen, dass einerseits Systole und Steigen der Curve, andererseits Diastole und Sinken der Curve der Zeit nach sich decken. Da nun bei gleichmässiger Bewegung des Cylinders, auf welchem die Pulscurve verzeichnet wird, die Dauer jeder positiven und negativen Welle durch deren bezügliche Abscissen gegeben ist, so scheint die Curve über das Verhältniss, welches wir untersuchen, unmittelbaren Aufschluss zu geben. Es würde, der vorstehenden Voraussetzung zu Folge, die Dauer der Systole sich zur Dauer der Diastole ebenso verhalten, wie der zur aufsteigenden Welle gehörige Theil der Abscissenlinie $a\,b$, $a'\,b'$, $a''\,b''$ zu dem Theile $b\,a'$, $b'\,a''$, $b''\,a'''$, welcher zur absteigenden Welle gehört.

---

*) Diese subtile Unterscheidung eines accentuirten Klanges zu Anfange des ersten Herztones kann nicht füglich auf subjectiver Täuschung beruhen, denn unterschiede man nicht in der angegebenen Weise, so könnten die Pendelbeobachtungen über die Dauer des ersten Intervalls, an einer und derselben Person angestellt, nicht übereinstimmen. Ich machte in Dorpat Versuche der Art in Gemeinschaft mit Prof. Bidder und Dr. Schneider, und wir stellten, bei Auscultation an derselben Person, den Pendel so gleichmässig, dass unsere jederseitigen Zeitbestimmungen nur um ein Minimum von einander abwichen.



Diese Voraussetzung ist freilich nicht absolut richtig, allein sie dürfte sich von der Wahrheit um so weniger entfernen, je näher am Herzen das Kymographion angebracht wurde. Ich habe über diesen Gegenstand mit meinem verehrten Freunde Wilhelm Weber gesprochen, welcher in Fragen über die Wellenbewegung wohl unbestritten die entscheidenste Stimme hat. Seiner Meinung nach ist in allen Versuchen, welche mit dem Ludwigschen Apparate unweit des Herzens ausgeführt werden, die von mir aufgestellte Voraussetzung insoweit unbedenklich, als die Rechnungsfehler, welche sie mit sich bringt, nur sehr unbedeutend sein können.*)

§ 179. Mit Bezug auf das Gesagte schliesse ich aus zahlreichen Beobachtungen, welche ich angestellt habe, Folgendes:

1) Bei den Säugethieren haben Systole und Diastole annäherungsweise gleiche Dauer. Bisweilen ist die aufsteigende Curve, bisweilen aber auch die absteigende steiler, was beweisen würde, dass die Systole sogar länger dauern kann als die Diastole, wenn nicht diese feineren Unterschiede möglicher Weise schon in die Beobachtungsfehler fielen. Man betrachte unter den

*) Es bedarf der Bemerkung kaum, dass aus den Abscissentheilen der positiven und negativen Wellen auf das Verhältniss der Systole zur Diastole nur dann sich folgern lässt, wenn man Pulscurven vor sich hat, in welchen die Undulation der Linie der reine Ausdruck der Herzbewegung ist und nicht etwa eine Resultante aus Herzpuls, Athmen, Körperbewegung u. s. w. Dergleichen normale Pulscurven gewinnt man bei Pferden und Schafen viel häufiger als bei Hunden, am leichtesten aber bei kaltblütigen Thieren, da bei diesen die Respirationsstörungen wegfallen, welche die Regelmässigkeit am meisten beeinträchtigen.

von Ludwig mitgetheilten Curven Nr. 6 und 8, nach Beobachtungen am Pferde, und Nr. 9, nach Beobachtungen am Hunde. Sehr beweisend ist auch eine von mir am Schafe gemachte Beobachtung.

2) Bei kaltblütigen Thieren wird das Verhältniss der Diastole zur Systole weit grösser, besonders bei Fischen. Bei Fröschen fand ich das Verhältniss schwankend zwischen 2 : 1 und 11 : 1, bei einem Hechte sogar 20 : 1.

3) Bei geschwächten Thieren nimmt mit allmäligem Seltnerwerden des Pulses das Verhältniss der Diastole zur Systole auffallend zu. Diese Bemerkung habe ich allerdings nur an kaltblütigen Thieren zu machen Gelegenheit gehabt.

4) Bei Fröschen ergab sich das ganz interessante Resultat, dass die Dauer der Systole annäherungsweise constant, dagegen die der Diastole sehr variabel war, so dass die Veränderlichkeit des in Frage gestellten Verhältnisses fast nur von der wechselnden Grösse der Diastole abhängt. Ich werde diese Angabe durch Zahlen belegen und bemerke nur noch, dass die Beobachtungen, auf welche sie sich stützt, nicht nur deshalb volles Zutrauen verdienen, weil in den Pulscurven des Frosches die Respirationsstörungen fehlen, sondern auch deshalb, weil der Manometer in den einen Aortenbogen wenige Linien unterhalb des Herzens eingebracht wurde.

Tabelle

über das Verhältniss der Systole zur Diastole in Fröschen.

Frosch	Breite des Abscissentheiles in Mill. *) für die Systole	für die Diastole	Verhältniss der Systole zur Diastole
A	4,8	8,0	$\frac{1}{1,6}$
	4,7	8,8	$\frac{1}{1,8}$
	5,0	8,9	$\frac{1}{1,8}$
	5,0	8,8	$\frac{1}{1,8}$
	5,0	9,0	$\frac{1}{1,8}$

*) 6 Mill. der Abscisse entsprechen 1 Secunde. (Vergl. Tab. V. Fig. 6.)

Frosch	für die Systole	für die Diastole	Verhältniss der Systole zur Diastole
	5,0	20,0	$\frac{1}{4}$
	5,0	21,5	$\frac{1}{4,3}$
B	4,9	34,0	$\frac{1}{6,9}$
	5,0	34,2	$\frac{1}{6,8}$
	5,0	33,0	$\frac{1}{6,6}$
	3,7	33,5	$\frac{1}{9}$
C	3,5	37,0	$\frac{1}{11}$
	3,5	31,1	$\frac{1}{8,8}$

Die durch Keils Ansehen sehr verbreitete Ansicht, die Systole verhalte sich zur Diastole = 1 : 2, entbehrt alles Grundes. Auch Joh. Müllers Angabe, dass die Diastole viel länger dauere als die Systole, kann nur bei kaltblütigen Thieren für richtig gelten.

§ 180. Schon Haller lehrte, dass die Diastole der Ruhe des Herzmuskels entspreche. Wenn man neuerlich die Ausdehnung des Herzens als einen activen Zustand betrachtete und sogar zwischen den motorischen Nerven unterschied, welche einerseits die Systole, andererseits die Diastole bewirken sollten, so kann dies nur als ein Rückschritt gelten. Zwei Umstände beweisen die passive Natur der Diastole sehr entscheidend. Zunächst giebt es überhaupt keinen Muskel, welcher sich nicht im Augenblicke der Erregung zusammenzöge, und auch die Herzmuskeln verkürzen sich bei Anwendung geeigneter Reize ohne Ausnahme. Zweitens aber ist die Diastole, inwiefern sie als wirkliche Ausdehnung und nicht blos als Erschlaffung auftritt, unverkennbare Wirkung des Blutandranges, also Folge einer mechanischen Kraft, welche ursprünglich von der Systole ausgeht.

Die Unterscheidung der blossen Erschlaffung von der wirklichen Ausdehnung hat keine Schwierigkeit. Man legt das Herz eines Frosches vorsichtig frei, um jeden Blutverlust zu vermeiden,

und misst das Volumen des Herzens während der Diastole. Dann durchschneidet man die Hohlvenen und misst zum zweiten Male. Hierbei findet sich, dass unmittelbar nach der Durchschneidung der zuführenden Gefässe das Volumen des Herzens während der Diastole um ein sehr Bedeutendes, manchmal fast um die Hälfte, abnimmt, ein unwiderleglicher Beweis, dass der Grad der Expansion von dem Volumen des eingetriebenen Blutes abhänge.

§ 181. Die Erklärung der Herzbewegung hat zur Aufstellung der verschiedensten Hypothesen Anlass gegeben. Indem ich selbst zur Untersuchung der ursächlichen Verhältnisse übergehe, kann ich mich nicht entschliessen, Alles, was in diesem Bezuge gedacht und oft nur geträumt worden ist, einer kritischen Erörterung zu unterwerfen, vielmehr begnüge ich mich mit den Prüfungen zweier Ansichten, die in der gegenwärtigen Periode fast ausschliesslich Anhänger finden, ohne dass es der einen oder anderen gelungen wäre, eine vorzugsweise Geltung zu erringen. Die eine Erklärung geht von der Reizbarkeit der Muskeln aus, die andere von dem regulatorischen Einflusse der Nerven.

Bekanntlich war es Haller, von welchem die erstere Ansicht mit solchem Glücke verfochten wurde, dass die bewundernden Zeitgenossen ihn sogar als den Entdecker der Irritabilität betrachteten. Seiner Meinung nach war die Contractilität eine Grundkraft des Muskels, welche nur der Einwirkung eines geeigneten Reizes bedurfte, um sich durch Verkürzung der Fasern geltend zu machen. Diese Kraft sollte zwar durch den Einfluss der Nerven geweckt werden können, im Uebrigen aber selbstständig und von den Nerven unabhängig sein. Das Herz, als Muskel, musste nun ebenfalls im Besitze dieser Grundkraft sein, und das Blut wurde als das Reizmittel betrachtet, welches die Contractionen veranlasste. Durch die Systole entleert sich das Herz vom Blute, und indem es auf diese Weise die Ursache seiner Zusammenziehung entfernt, fällt es in den ursprünglichen passiven Zustand der Erschlaffung zurück. Auch die Reihenfolge der Herz-

bewegung war, nach Hallers Ansicht, von diesem Standpunkte aus verständlich. Indem nämlich das Venenblut zuerst in die Vorhöfe eindränge, sollten diese, als die zuerst gereizten, sich auch früher zusammenziehen als die Kammern, welche erst von den Atrien ihr Blut erhielten.

Diese Theorie hatte noch zu auffallende Mängel, als dass selbst die Anhänger Hallers sie ganz hätten leugnen können. Der treffliche Fontana, ein eifriger Verfechter der Irritabilitätslehre, musste zwei Einwürfe einräumen, nämlich erstens, dass auch das blutleere Herz noch pulsire, in welchem Falle der von seinem Vorgänger als wesentlich betrachtete Reiz fehlte, und zweitens, dass Expansionen auch in einem mit Blut erfüllten Herzen vorkommen können, unter welchen Umständen die Erschlaffung der Vorhöfe und Kammern nicht aus der Abwesenheit des normalen Reizes erklärbar ist. *) Indess suchte Fontana diese Schwierigkeiten zu beseitigen. Das von Blut entleerte Herz bewegte sich seiner Meinung nach auf Anlass ausserordentlicher Reize, vor Allem in Folge des Luftreizes, und die Erschlaffung des mit Blut erfüllten Herzens betrachtete er als Folge der Erschöpfung. Er machte darauf aufmerksam, wie zu den Grundeigenschaften des Muskels auch diese gehöre, dass er im Zustande der Contraction nur vorübergehend bleiben könne, in der Regel nur kurze Zeit, selbst wenn der Reiz anhalte, und dass nach einem allgemeinen Gesetze auf die active Verkürzung der Faser die passive Erschlaffung folge. Hiermit glaubte Fontana den Wechsel der Systole und Diastole aus dem Wesen der Reizbarkeit selbst begreiflich gemacht zu haben. Auf die Systole musste Diastole folgen, weil die Irritabilität eben durch die Contraction erschöpft war, und auf

*) Haller selbst hatte beobachtet, dass ein Herz nach Unterbindung der Aorte fortpulsire, also abwechselnd sich contrahire und erschlaffe (a. a. O. I. 398.), und hatte hiermit den einen Theil seiner Hypothese vollkommen unmöglich gemacht. Dergleichen Widersprüche begegnen dem grossen Physiologen überaus häufig, wenn er sich aus dem Gebiete der Beobachtung in das ihm wenig zugängliche der Theorie verirrt.

die Diastole musste eine Systole folgen, weil, sobald sich das Herz erholt hatte, es an dem Reize nicht fehlte, welcher zur Ursache einer neuen Thätigkeit wurde.

§ 182. Die Lehre von der Muskelirritabilität hat unter dem Einflusse verschiedener Forscher so manche Modificationen erfahren, aber ein Punkt wurde von Allen fest gehalten, welche die Herzbewegung aus der Irritabilität ableiteten, der Lehrsatz Hallers nämlich, dass das Blut den Reiz abgebe, welcher im normalen Leben die Pulse veranlasse. Ich meinerseits leugne die Zulässigkeit dieses Dogmas und zwar aus folgenden Gründen.

1) Während die Menge und die Mischung des Blutes höchstwahrscheinlich unverändert bleiben, veranlassen Gemüthsaffecte plötzliche Veränderungen in der Zahl und Kraft der Pulse. Dies deutet an, dass das Blut nicht die einzige Ursache der Herzbewegung, sondern eine unter mehreren oder vielen ist. Dies ändert den Stand der Dinge bereits wesentlich. Denn wenn der Puls die Wirkung verschiedener Ursachen ist, so entsteht die Frage, welchen Antheil jede derselben an dem Totaleffect habe, und es könnte sich finden, dass ein anderes Causalmoment noch wichtiger sei als das Blut selbst. Auf die weitere Untersuchung dieser Frage werde ich zurückkommen.

2) Bei warmblütigen Thieren ist nichts gewöhnlicher, als dass Verminderung der Blutmenge den Puls vermehre. Ich habe dies überaus häufig gesehen, und bei Pferden namentlich in der Weise, dass die Frequenz des Pulses annäherungsweise in demselben Verhältniss zunahm, als ich kannenweise mehr und mehr Blut abliess. Haller hat das Aufhören des Pulses beim Schlachten der Thiere als Beweis benutzt, dass das Blut den natürlichen Reiz des Herzmuskels abgebe; man sollte nun erwarten, dass mit Verminderung des Reizes der Puls vielmehr seltener als häufiger werde, denn vom Standpunkte der Hallerschen Erregungstheorie erscheint das Seltenerwerden als der Uebergang zum Aufhören.

3) Wäre das Blut die Ursache der Herzcontraction, so müsste

es in anderen Muskeln ebenfalls Contractionen veranlassen, was nicht der Fall ist. Alle willkürlichen Muskeln sind der Einwirkung des Blutes ausgesetzt, aber diese Einwirkung allein reicht nicht aus, sie in Bewegung zu setzen. Mit welchem Rechte ist nun anzunehmen, dass das Muskelgewebe des Herzens sich anders verhalte? Die Anhänger der Irritabilitätstheorie haben diese Frage nie genügend beantworten können. Haller selbst meinte, die sensiblen Nerven des Herzens lägen unmittelbar an der inneren Oberfläche der Höhlen und wären der reizenden Einwirkung des Blutes mehr Preis gegeben. Andere behaupteten, der Herzmuskel sei vor allen anderen irritabel. Beide Entgegnungen sind aus der Luft gegriffen.

Anlangend Haller, so war es erstens eine Inconsequenz, dass er die sensiblen Nerven in die Irritabilität hineinzog, die ja eben ohne die Nerven bestehen sollte;*) zweitens ist unerwiesen, dass die sensiblen Nerven an den inneren Wandungen des Herzens oberflächlich liegen, und drittens ist es nicht das Blut in den Höhlen des Herzens, welches als Reizmittel betrachtet werden kann, sondern wenn es überhaupt reizt, so ist es das Blut in den Capillaren, von welchem die Erregung ausgeht. Den Beweis für die letzte Bemerkung bietet der Umstand, dass selbst das vollständig entleerte und mit Wasser abgespülte Herz noch pulsiren kann. Unter diesen Umständen würde es ganz gleichgültig sein, wenn die innere Seite des Herzens eine vorzugsweise Irritabilität besässe; überdies hat Fontana nachgewiesen, dass diese Annahme nicht begründet sei (a. a. O. 155).

Was aber die Meinung betrifft, das Herz sei irritabler als andere Muskeln, so würde die Vorfrage zu beantworten sein, was als Mass der Irritabilität gelte. Mit Recht bemerkt Fontana, dass der Streit um die Grösse der Reizbarkeit ein sehr unsicherer sei. Sucht man die Grösse der Muskelirritabilität in der Tenacität des Vermögens, auf Anlass gegebener Reize Contractionen zu

*) Diesen Einwurf hat schon Fontana seinem Freunde gemacht. *Ricerche filosofiche etc. Firenze* 1775. p. 144.

Stande zu bringen, so ist die Irritabilität des Herzens kaum grösser als die der willkürlichen Muskeln, und in manchen Fällen beträchtlich geringer, wovon sich bei Whytt, Fontana, Nysten und selbst bei Haller zahlreiche Beispiele finden.

Das Blut, welches durch die Haargefässe der willkürlichen Muskeln fliesst, lässt diese in ihrer Ruhe. Contractionen erfolgen in diesen Muskeln nur, wenn ausser der motorischen Bedingung, welche vom Blute ausgeht, noch ein anderer Impuls gegeben ist, und es fehlt durchaus an genügenden Gründen anzunehmen, dass im Herzmuskel die Lage der Dinge eine andere sei.

4) Wenn man den *nervus vagus* in die Kette des elektromagnetischen Apparates bringt, so steht der Puls still, das Herz erweitert sich und füllt sich im Uebermasse mit Blut. Demnach fehlt der Reiz nicht, welcher der Annahme Hallers zu Folge ein Pulsiren vermitteln sollte. Reizt man jetzt das Herz durch mechanische Berührung, so erfolgt eine einzelne Contraction, folglich ist das Herz auch reizbar. Dieser Versuch liefert den entscheidensten Beweis, dass die Contraction des Herzens noch etwas Anderes sei als ein Product der von Haller erwähnten beiden Factoren, des Blutes nämlich und der irritablen Herzfaser.

Fragen wir nun: wie kam Haller und seine Schule zu der Behauptung, dass das Blut der Reiz sei, welcher die Contractilität des Herzmuskels ins Spiel setze? so kommt man in die Verlegenheit, Männer von den entschiedensten Verdiensten einer gewissen Oberflächlichkeit bei Begründung dieser Lehre zeihen zu müssen. In der That sind die empirischen Belege für die Hallersche Theorie von sehr geringem Gewichte.

Es ist wahr, ein Herz hört endlich auf zu schlagen, wenn man ihm das Blut entzieht, aber dasselbe erfolgt, wenn man die Temperatur des Herzens unter einen gewissen Grad herabdrückt. Der Versuch beweist also mehr nicht als dies, dass der Herzmuskel, welchen man aus seinen natürlichen Bedingungen herauszieht, unfähig wird, seine normale Thätigkeit fortzusetzen.

Es ist ferner wahr, dass ein ausgeschnittenes Herz, welches

aufgehört hat zu pulsiren, bisweilen seine Thätigkeit wieder aufnimmt, wenn es mit frischem Blute injicirt wird, aber unentschieden bleibt, ob dies daran liegt, dass das Blut reizt, oder daran, dass es eine der verschiedenen Bedingungen sei, unter welchen die Ursache, von welcher die Herzbewegung unmittelbar abhängt, allein wirksam sein kann.

Erfahrungen, welche schlagender als die eben mitgetheilte die Natur des Blutes als Reizmittel des Herzmuskels nachwiesen, erinnere ich mich nicht gefunden zu haben, aber so unvollständige und zweideutige Beweise können im Vergleich mit den oben entwickelten Gegengründen nicht aufkommen.

Die Hallersche Lehre laborirt, wie mich dünkt, an Unklarheit in den Grundbegriffen. Man frage sich: was ist ein Reiz? und weiter: entspricht die Einwirkung des Blutes auf den Körper dem Begriffe desselben? Um hierauf richtig zu antworten, muss man bedenken, dass Alles, was geschieht, die Folge seiner gegebenen Bedingungen ist, nicht einer, sondern vieler. Jeder Reiz ist auch ein Bedingendes, aber umgekehrt ist nicht jedes Bedingende auch ein Reiz. Wir werden also die allgemeinen Bedingungen eines organischen Vorganges von jener besonderen Art der Bedingungen zu sondern haben, welche Reiz heisst. Es giebt Bedingungen, welche die organischen Vorgänge überhaupt möglich machen, sie begründen die lebendige *δυναμις*; es giebt andere, welche das Mögliche zum Wirklichen machen; nur solche nennt man Reize. Dieser Umsatz des Möglichen ins Wirkliche geschieht nie ohne eine gewisse Veränderung der Organisation. Jede Erregung durch Reize führt schliesslich zu Erschöpfung.

Hat man sich diese Verhältnisse klar gemacht, so wird es keine Schwierigkeit haben, dem Blute seine rechte Stelle im Organismus anzuweisen. Es ist allgemeine Lebensbedingung, nicht eine solche spezielle Bedingung, die wir Reiz nennen. Es begründet organische Vorgänge in ihrer Möglichkeit, veranlasst aber nicht, dass das Mögliche, z. B. Sensibilität, auch zum Wirklichen werde, also Sensation. Das Blut verändert nicht die ma-

teriellen Bedingungen der organischen Vorgänge in der Weise, dass die Fortsetzung dieser Vorgänge ihrem allmäligen Ende zugeführt würde; es erschöpft nicht durch seine Einwirkung, sondern gerade im Gegentheil, es erhält die materiellen Fundamente im gehörigen Zustande, ja es stellt wieder her, was verdorben wurde.

Dies die Bedeutung des Blutes im Allgemeinen; unstreitig hat es im Herzen keine andere. Es ist eine Bedingung der Contractilität, nicht aber die Ursache der Contractionen.

§ 183. Die Auffassung des Blutes als Reizmittel ist auch deshalb unzulässig, weil die Systole, der Effect des Reizes, vorüber geht, während das Irritans, also die angebliche Ursache der Bewegung, noch fortdauert. Wir haben gesehen, dass Fontana diese Schwierigkeit durch die Annahme zu beseitigen suchte, die Irritabilität werde durch die Contraction erschöpft, und durch die Erschöpfung werde der allerdings vorhandene Reiz wirkungslos. Es wird jetzt darauf ankommen zu untersuchen, inwieweit diese Annahme haltbar sei.

Aber ehe ich zu dieser Untersuchung übergehe, sei kürzlich angedeutet, wohin sie führe. Fontanas Theorie ist offenbar nur eine Verfeinerung der Hallerschen; sie sucht einem handgreiflichen Mangel der letzteren abzuhelfen, während sie ihr Grundprinzip: Das Blut wirkt als Reiz, beibehält. Wer sich im Vorhergehenden mit mir überzeugt hat, dass dies Prinzip unzulässig sei, für den hat Fontanas Lehre bereits alle Bedeutung verloren. Unsere Frage kann also nur dahin gehen: was leistet die Erschöpfungstheorie des berühmten italienischen Forschers auf dem Standpunkte, von welchem sie ausgeht? Nach meiner Meinung wenig oder nichts, selbst wenn man die Wirkung des Blutes als Reizmittel einräumen wollte.

Nach Fontana würde der Rhythmus des Herzschlags in folgender Weise begründet sein: Das Blut, und im ausgeschnittenen Herzen die Luft, reizt die irritable Muskelfaser und diese

antwortet auf den Reiz durch Contraction. Die Zusammenziehung müsste bei der Beständigkeit des Reizes eine constante sein, wenn nicht Erschöpfung einträte und gebieterisch einen Nachlass der Thätigkeit forderte. Mit diesem Nachlasse der Thätigkeit, welcher sich in der Periode der Diastole als Erschlaffung darstellt, tritt Ruhe ein, und die Ruhe bringt Erholung mit sich. Nach einer mehr oder weniger kurzen Ruhe ist aber die Herzkraft so weit wieder hergestellt, dass sie auf den ihrer harrenden Reiz (harrend, weil er constant ist) von Neuem reagiren kann.

Diese Erklärung wäre höchst ingeniös zu nennen, wenn sie nicht mit den Gesetzen der Reizbarkeit in unverträglichstem Widerspruch stände. Ich will ganz bei Seite setzen, dass die vorgebliche Erschöpfung des Herzens am Ende der Systole durch nichts erwiesen, vielmehr im hohen Grade unwahrscheinlich ist; aber mit welchem Rechte darf Fontana behaupten, dass ein Organ unter dem constanten Einflusse eines Erschöpfung bedingenden Reizes sich erholen und für denselben die bereits verlorene Empfänglichkeit wieder gewinnen könne?

Wenn Theile eines lebenden Körpers constant gereizt werden, sind nur zwei Folgen möglich. Entweder der Reiz ist für das vorhandene Reactionsvermögen zu heftig; dann folgt früher oder später eine Erschöpfung, welche mit gänzlicher Ertödtung des Gliedes endigt; oder der Reiz ist erträglich; dann gewöhnt sich das Organ an denselben, d. h. es reagirt gegen dessen Einwirkung nicht mehr mit derselben Energie als vordem. Jede Gewöhnung bedingt eine gewisse Abstumpfung und hat zur unausbleiblichen Folge, dass ein Reiz, welcher zur Herstellung einer gewissen Wirkung genügte, fortan nicht mehr genügt. Aber nie kommt es vor, dass die Erschöpfung zum Mittel der Erholung werde. Zur Erholung führt nur Ruhe, d. h. ein Zustand, wo die ermüdenden Reize aussetzen und den erschöpften Quellen der Lebenskraft Zeit gönnen, sich wieder zu füllen.

Diese Sätze gelten, eben weil sie gesetzlicher Natur sind,

auch für die Muskeln. Wenn ein constanter Reiz auf einen Muskel wirkt, z. B. der des Willens oder der einer elektromagnetischen Rotationsmaschine, so entsteht eine stetige Contraction, welche erst mit Erschöpfung endigt und dann natürlich jede weitere Einwirkung desselben Reizes unmöglich macht. Nie entsteht ein wechselndes Spiel von Zusammenziehung und Abspannung, bei welchem letztere den Kraftverlust ersetzte, den erstere herbeiführte. Der Missgriff Fontanas besteht also darin, dass er die Diastole als eine Periode der Ruhe und Erholung auffasste, was von seinem Standpunkte aus nicht zulässig war. Denn wer wie er das Blut als einen constanten Reiz betrachtet, in dessen Gefolge Erschöpfung auftritt, der begiebt sich des Rechtes, die Diastole als ein Mittel der Wiederherstellung der Kräfte aufzuführen. Sie ist unter solchen Umständen nur Unthätigkeit, nicht Ruhe; sie ist eine Unthätigkeit der Ohnmacht, welche, weil das fortdauert, was reizt und schwächt, nur mit einem gänzlichen Versiegen der Kräfte enden könnte.

§ 184. Haller und seine Schule waren nicht im Stande, den Wechsel der Systole und Diastole befriedigend zu erklären, aber den Typus des Wechsels, ich meine die gesetzliche Reihenfolge der Bewegungen, erklären sie noch viel weniger. Die Irritabilitätslehre gewährt nicht den mindesten Aufschluss darüber, warum die Contraction in den Venenmündungen beginne, dann in den Vorhöfen auftrete und schliesslich die Kammern erfasse; sie lässt uns vollkommen im Unklaren über den Synchronismus der linken und rechten Herzhälfte.

Wir bedürfen zur Erklärung der Herzbewegung einer anderen Hypothese; es wird aber nach Beseitigung der Hallerschen Irritabilität nichts übrig bleiben, als an die Mitwirkung der Nerven zu denken.

Es scheint mir fast unabweislich anzunehmen, dass das Typische in der Herzbewegung seinen Grund in der Einwirkung eines nervösen Centralorgans habe, welches in den Gang der Begebenheiten ordnend eingreift. Die Gründe, welche zu dieser

Hypothese Veranlassung geben, bestehen aber nach Ausschneidung des Herzens unverändert fort, daher das Centralorgan nur im Inneren des Herzens selbst zu suchen ist. Nun sind meiner Meinung nach die Herzganglien die einzigen Theile, welche mit einem Centralorgane verglichen werden können, und ich habe daher schon in meinen früheren Schriften die Hypothese aufgestellt, dass die im Herzen befindlichen Ganglien die Function eines regulatorischen Apparates haben. In einem Werke über Hämodynamik ist die Beleuchtung dieser Hypothese ganz an ihrem Platze, und ich werde daher die Gründe, welche sie unterstützen, ausführlich und im Zusammenhange vorlegen. *)

§ 185. Ich behaupte, zunächst im Allgemeinen, dass die gesetzliche Reihenfolge der Herzbewegungen, welche im ersten Paragraphen dieses Abschnittes geschildert wurde, das Vorhandensein eines regulatorischen Apparates ausser allen Zweifel setze.

Es ist nämlich Thatsache, dass im Herzen zwei Formen von Bewegungen vorkommen. Die eine zeigt einen gesetzmässigen Typus und ist nach einem bestimmten Plane so geordnet, dass sie den Zwecken des Kreislaufs in vollem Masse entspricht; die andere dagegen ermangelt des typischen Herganges und entspricht den organischen Zwecken weit weniger, oft gar nicht.

Es wäre überflüssig, auf die normalen Bewegungen nochmals zurückzukommen; anlangend die anormalen, so sind sie Folgen der verschiedenartigsten Störungen und zeigen die verschieden-

*) Zu vergleichen sind: Nachweisung der Nervencentra, von welchen die Bewegung der Lymph- und Blutgefässherzen ausgeht. Von A. W. Volkmann. Müllers Archiv 1844. p. 419. — Beitrag zur näheren Kenntniss der motorischen Nervenwirkungen von A. W. Volkmann. Ibid. 1845. p. 406. — Meine Abhandlung: Nervenphysiologie, in R. Wagners Wörterbuch II. — Als Gegner dieser Arbeiten ist Herr Dr. J. Budge aufgetreten in einem Artikel: Die Abhängigkeit der Herzbewegungen vom Rückenmarke und Gehirne, durch neue Untersuchungen nachgewiesen; Archiv für physiolog. Heilkunde, Bd. V. S. 319; und: Sympathischer Nerv mit besonderer Rücksicht auf Herzbewegung, in Wagners Wörterbuch III. Budge nimmt wie Haller an, dass das Blut den normalen Reiz des Herzmuskels abgebe, eine Annahme, deren Unzulässigkeit nun hinreichend erwiesen sein dürfte.

sten Gestalten. Wenn man bei einem frisch getödteten Thiere den Brustkasten öffnet, so geht die anfangs noch regelmässige Bewegung alsbald in eine regellose über. Die Vorhöfe pulsiren häufiger als die Kammern, sie contrahiren sich 5, 10, ja 100 Mal in derselben Zeit, wo die Kammern sich nur ein Mal zusammenziehen. In einer noch späteren Periode verschwindet der Synchronismus der linken und rechten Herzhälfte, die eine pulsirt häufiger als die andere, oder die eine pulsirt, während die andere aller selbstständigen Bewegungen schon verlustig ist.*)

Wenn man den *n. vagus* in die Kette des elektromagnetischen Apparates bringt, steht das Herz mehr oder weniger lange still und beginnt erst nach längerer Unterbrechung seiner Bewegung wieder zu pulsiren. Wenn man dagegen die Herzkammern in die Kette bringt, so entsteht ein sehr beschleunigter Puls, dann ein eigenthümliches, planloses Zucken und Wühlen in den einzelnen Herzmuskeln, und endlich bildet sich eine mehr oder weniger ausgebreitete, anhaltende Contraction, welche bei grösseren Thieren meist nur einen Theil des Herzens ringförmig zusammenschnürt.**)

Wenn man in das Herz kaltblütiger Thiere Einschnitte bis zu einer gewissen Tiefe anbringt, so geht der regelmässige Typus der Bewegung, nicht aber diese im Allgemeinen, verloren. Die Folge eines Querschnittes zwischen Vorhöfen und Kammern kann die sein, dass die Contraction der Kammern nicht unmittelbar nach derjenigen der Vorhöfe eintritt. Durch einen Längenschnitt, welcher die linke und rechte Herzhälfte theilweise trennt, kann man bewirken, dass der Synchronismus beider aufhört.***)

Aber auch im lebenden Thiere kommen pathologische Zu-

---

*) Derartige Unordnungen sind schon von Haller und Fontana sorgfältig beobachtet und beschrieben worden.

**) Genaueres über die hier erwähnten Störungen in Webers Abhandlung über Muskelbewegung und in einem von mir bearbeiteten Artikel in Müllers Archiv 1845. S. 416.

***) Die ausführlichen Versuche in Müllers Archiv 1844. S. 426.

stände vor, wo der Typus der Herzbewegung gestört ist. Hierher gehört der *pulsus intermittens, inaequalis, tremulans* u. s. w. Erfahrungen, wie die mitgetheilten, beweisen, dass jeder Theil des Herzens seine Reizbarkeit für sich besitzt und dieselbe ganz unabhängig von den übrigen durch Bewegungsphänomene geltend machen kann. Im normalen Herzschlage findet aber eine Unabhängigkeit der einzelnen Muskelbündel nicht statt, vielmehr ist jede Faser in ihrem Wirken an einen bestimmten Plan der Bewegung gebunden. Kann nun die Bewegung unter gewissen Umständen geordnet sein und unter anderen Umständen ungeordnet, so muss im ersten Falle ein ordnendes Prinzip wirken, welches in letzterem Falle nicht wirkt.

Fassen wir das Gesagte noch allgemeiner auf, so ist Alles, was geschieht, die Folge seiner gegebenen Bedingungen, und wo Verschiedenes geschieht, liegen auch verschiedene Bedingungen zu Grunde. Wenn nun unverkennbar zwei Formen der Herzbewegung vorliegen, einerseits ein regelloses Spiel von Contractionen und Expansionen, andererseits eine bestimmten Zwecken entsprechende und gesetzlich geordnete Pulsation, so folgt aus allgemeinen Grundsätzen, dass so verschiedene Formen des Geschehens aus verschiedenen Bedingungen fliessen. Ist die Bewegung eine geregelte, so muss eine regulirende Bedingung vorhanden sein; diese Behauptung ist unangreifbar, und nur über das Wie und Wo der substruirten Bedingung ist ein Streit möglich.

§ 186. Auch Haller erkannte die Nothwendigkeit, das Typische der Herzbewegung auf einen bestimmenden Grund zurückzuführen, und verwies in dieser Beziehung auf die Richtung des Blutstroms. Er meinte, da das rückkehrende Blut zuerst die grossen Venenstämme, dann die Vorhöfe und schliesslich die Ventrikel durchströme, so müssten diese Theile in derselben Reihenfolge sich contrahiren, wie sie nach einander vom Blute gereizt würden. Es liegt in dieser gedankenlosen Erklärung ein neuer Beweis, wie unfähig jener gelehrte und fleissige Beobachter

zu theoretischen Betrachtungen war. Haller selbst hatte erwiesen, dass die Ursache der Blutbewegung im Herzstosse liege, und nun sollte umgekehrt der Blutstrom die Bewegungen des Herzens veranlassen. Das Herz sollte ein Mal der Pumpe gleichen, welche treibt, das andere Mal dem Mühlrade, welches getrieben wird!

Haller hätte bedenken sollen, dass auch am ausgeschnittenen Herzen jene gesetzliche Reihenfolge von Bewegungen beobachtet werde, welche seiner Behauptung nach von der Richtung des Blutstroms abhängt.

Die Vertheidiger der Irritabilitätstheorie sahen sehr bald ein, dass dieser Theil der Hallerschen Lehre nicht haltbar sei; sie liessen die falsche Erklärung fallen, ohne sich sonderlich darum zu kümmern, ob auf dem Boden, den sie behaupten wollten, eine richtige überhaupt möglich sei. So ging es auch meinem Kritiker, Herrn Budge, welcher vorauszusetzen scheint, dass mit einem irritablen Herzmuskel und mit dem Blute als Reizmittel der normale Herzschlag sich von selbst mache. Diese Voraussetzung ist, wie oben erwiesen wurde, unrichtig. Man kann den normalen Typus der Herzbewegung künstlich umändern, ja man kann sogar die selbstständige Bewegung auf einige Zeit gänzlich unterdrücken, während man Irritabilität und Blut unangefochten lässt, folglich ist die selbstständige und geordnete Herzbewegung ein Anderes als blosse Reizbewegung, und dieses Andere bedarf eines besonderen Grundes.

§ 487. Schon Flourens deutete darauf hin, dass planmässig geordnete Bewegung nur unter Mitwirkung eines nervösen Centralorgans zu Stande komme. In meiner Abhandlung über Nervenphysiologie ist diese wichtige Wahrheit durch Mittheilung zahlreicher Thatsachen noch fester begründet worden, und ich habe keine Veranlassung, von dem dort Gesagten das Mindeste zurückzunehmen. Es ist bekannt, dass bei den höheren Thieren wenigstens alle Formen der willkürlichen Bewegung an das Bestehen des Gehirns gebunden sind. — Die Combination der Athembewegungen hat ihren Regulator im verlängerten Marke,

und wenn Budge behauptet, es sei genugsam bekannt, dass bei Enthauptung von Thieren der Kopf ebensowohl athme als der von diesem getrennte Rumpf, so lässt sich nur erwiedern, dass gerade das Gegentheil vollständig erwiesen sei.*) Die geregelten Bewegungen, welche auch bei enthaupteten Thieren durch Reize hervorgerufen werden können, und welche unter dem Namen der reflectorischen bekannt sind, können nur so lange zu Stande kommen, als das Rückenmark noch thätig ist. Zwar kann man am Leichnam frisch getödteter Thiere auch nach der Zerstörung von Hirn und Rückenmark noch vereinzelte Reizbewegung erzeugen; man kann ferner durch Anwendung weit reichender Reize eine Menge von Muskeln gleichzeitig ins Spiel bringen, aber man kann durch kein experimentelles Kunststück den regulatorischen Einfluss der Centralorgane ersetzen; die Bewegungen sind in allen solchen Fällen vollkommen planlos und, je weiter verbreitet sie sind, um so mehr unter sich selbst im Widerspruch. Man galvanisire einen Frosch, bei welchem man Hirn und Rückenmark zerstört hat, so dass alle Muskeln von dem Reize getroffen werden, und man wird sehen, dass Flexoren und Extensoren sich gleichzeitig zusammenziehen und sich in ihren Wirkungen wechselseitig aufheben.

Abstrahiren wir vom Herzen, so ist in allen Muskeln mit gestreiften Fasern die Abhängigkeit der zweckmässig combinirten Bewegungen von gewissen Centralorganen des Nervensystems ganz augenscheinlich; es kann also ein ähnliches Abhängigkeitsverhältniss des Herzens selbst nur von denen bezweifelt werden, welche die Folgerungen einer vorsichtigen Analogie für nichts erachten.

Am wichtigsten in dieser Beziehung sind die an den Lymphherzen der Frösche gewonnenen Erfahrungen. Ich habe bewie-

*) Man vergleiche, anderer Autoren zu geschweigen: Le Gallois, *expér. sur le principe de la vie, Paris* 1812. p. 32 etc. Flourens, *expér. sur l'encéphale des poissons, mém. lu à l'académ. des sciences* § 2. Nr. 14 etc. Joh. Müller, Handbuch der Physiologie II. 74 etc.

sen, dass diese Organe gewisse regulatorische Apparate im Rückenmarke besitzen, mit deren Zerstörung der gesetzliche Typus der Pulsation augenblicklich aufhört.*) Hat die Analogie irgendwo Geltung, so ist es in diesem Falle; mich dünkt, Erfahrungen, wie die eben mitgetheilten, drängen gewaltsam zu der Annahme, dass auch die Pulsation des Blutherzens in irgend einem Nervencentrum ihren gesetzlichen Grund habe.

Jeden Falls ist die Behauptung unhaltbar, dass die gesetzliche Form der Herzbewegung, also der Synchronismus der rechten und linken Herzhälfte, der Vorschlag der Atrien vor den Ventrikeln u. s. w. durch die Anordnung der Muskeln anatomisch bedingt sei. Die Muskulatur des Herzens ist für die Ordnung der Bewegungen nicht bestimmend, sonst könnten ungeordnete Herzbewegungen überhaupt nie vorkommen. Gleichwohl sind Fälle der Art nicht eben selten, wie schon bemerkt wurde, und ich will hinzufügen, dass es bisweilen sogar gelingt, den Typus der Herzbewegung künstlich umzukehren. Wenn man z. B. Opium in passender Menge ins Herz spritzt, so verschwindet der Puls, aber nicht die Erregbarkeit. Wenn man in dieser Periode den Ventrikel reizt, so zieht sich erst dieser und unmittelbar nach ihm der Vorhof zusammen. Dieselbe Erfahrung kann man an einem Herzen machen, welches man längere Zeit dem elektromagnetischen Reize ausgesetzt und hierdurch zur Ruhe gebracht hat.

§ 188. Aber nicht nur der Charakter der Ordnung und Zweckmässigkeit, welchen die Herzbewegungen haben, sondern auch die Selbstständigkeit, mit welcher sie auftreten, scheint auf die Mitwirkung eines Nervencentrums hinzudeuten. Ich finde näm-

*) Müllers Archiv 1844. S. 419. Zwar hat Ekhard in der Zeitschrift für rationelle Medicin VIII. 211 behauptet, die Lymphherzen pulsirten auch dann fort, wenn man die zu ihnen führenden Nerven durchschneide; aber diese Angabe ist unrichtig, wie ich an einem anderen Orte durch die unzweideutigsten Beobachtungen bewiesen habe. Vergl. Berichte über die Verhandlungen der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissensch. 1849.

lich die Selbstständigkeit des Herzens in dem Vermögen, sich abwechselnd zu verengen und zu erweitern, während die äusseren Umstände, welche seine Bewegungen bedingen, constant dieselben bleiben. Denn da jeder wechselnde Vorgang doch irgend welche Veränderung seiner bedingenden Gründe erfordert, so bleibt in vorliegendem Falle bei constanten äusseren Bedingungen nichts übrig, als eine Veränderung der inneren vorauszusetzen, und hierin liegt eben die Selbstständigkeit.*)

Alle Bewegungen selbstständiger Art scheinen aber nur so lange möglich zu sein, als die Muskeln mit ihren bezüglichen Centralorganen in gehöriger Verbindung stehen. So hören die freiwilligen Bewegungen, welche den Charakter der Selbstständigkeit am entschiedensten an sich tragen, nach Zerstörung des Gehirns augenblicklich auf. Die Athembewegungen werden mit dem Momente aufgehoben, wo man die *medulla oblongata* zerstört, ebenso die selbstständigen Bewegungen der Lymphherzen des Frosches, wenn man ein Paar kleine Stellen des Rückenmarks ausschneidet, welche in der Gegend des zweiten und achten Rückenwirbels gelegen sind.

Ich schliesse hieraus, dass alle selbstständigen Bewegungen die Thätigkeit eines nervösen Centralorgans voraussetzen, ein Schluss, welcher durch die Eigenthümlichkeiten des Nervensystems und namentlich seiner Centra nicht wenig begünstigt wird. Denn wenn sich vorher zeigte, dass die organische Selbst-

*) Fontana hebt nicht nur die Selbstständigkeit der Bewegungen, sondern auch die der organischen Körper überhaupt gänzlich auf, indem er behauptet, dass jede Bewegung eine äussere Ursache haben müsse. Ein Blick auf die kosmischen Verhältnisse reicht aus zu zeigen, dass eine Existenz möglich sei, welche die Bedingungen ihrer Thätigkeit in sich selbst trage. Im Organismus, welcher nicht ohne tiefere Bedeutung als Mikrokosmus aufgefasst wurde, kehren ähnliche Verhältnisse wieder. Die grössere Selbstständigkeit, welche die lebenden Körper von den unbelebten unterscheidet, beruht darauf, dass sie einen Complex von Bedingungen enthalten, welcher ein in sich selbst Mobiles ist und Kräfte entwickelt, die sich wechselseitig und auch ohne Anlass von aussen verschiedentlich bedingen.

ständigkeit auf der Gegenwart eines Complexes von Bedingungen beruhe, welche in sich selbst veränderlich sind, so wird man schwerlich irgend einem Theile des Thierkörpers mit gleichem Rechte die Fähigkeit innerer Veränderungen zutrauen dürfen, als eben den Nerven und ihren Centralorganen.

Wenn nun das wechselnde Spiel des Pulses ganz den Anschein einer selbstständigen Bewegung hat, und wenn alle selbstständigen Bewegungen, deren Causalverhältnisse uns hinreichend bekannt sind, durch die Mitwirkung eines nervösen Centralorgans bedingt werden, so ist die Annahme nicht unberechtigt, dass auch der Herzpuls durch den Einfluss eines derartigen Centrums bedingt werde.

Diesen Folgerungen hat Budge die Bemerkung entgegen gestellt, dass selbstständige Bewegungen auch ohne Vermittelung eines Centralorgans auftreten könnten. Als Beweis für seine Behauptung führt er die Bewegungen an, welche Remack in dem Zwerchfelle von Kaninchen noch lange nach dem Tode und selbst am ausgeschnittenen Muskel beobachtete. Ich bekenne, dass mir diese Beobachtung nicht wichtig scheint. Jene undulirenden Bewegungen des Zwerchfells, welche übrigens mit dessen Athembewegungen, die unmittelbar vom verlängerten Marke ausgehen, nicht verwechselt werden dürfen, sind nichts Anderes als die planlosen Zuckungen, welche bis auf einen gewissen Grad wohl alle freigelegten Muskeln und vorzugsweise deutlich die Hautmuskeln unseres Schlachtviehes ausweisen. Schon Haller und Fontana haben diese Classe von Bewegungen nicht nur ausführlich beschrieben, sondern auch als Folgen äusserer Reize richtig aufgefasst.

Man bedenke, dass jene Undulationen des Zwerchfells nie während des Lebens, sondern erst nach dem Tode in einem der Luft freigelegten Organe unter ganz ungewöhnlichen Bedingungen vorkommen. Es scheint also ganz unbedenklich anzunehmen, dass der Reiz der Luft, die allmälig und ungleichmässig eintretende Erkaltung, die Verdampfung, die fluctuirende Blutbewegung in

den Haargefässen, jeden Falls aber äussere Ursachen die Veranlassung zu dieser Bewegung abgeben, die, wenn sie von inneren, organischen Gründen bedingt wäre, unfehlbar auch während der Dauer der ungestörten organischen Existenz vorkommen würde.

Mit mehr Schein des Rechtes könnten die peristaltischen Bewegungen ausgeschnittener Därme gegen mich angeführt werden, indess ist die Natur derselben noch viel zu dunkel, um bei Begründung theoretischer Fragen in Betracht zu kommen. Nach Budge würden die peristaltischen Bewegungen gar nicht als selbstständige, sondern als Reizbewegungen aufzufassen sein, indem sie nur nach Eröffnung der Bauchhöhle und nach Einwirkung des Luftreizes eintreten sollen. Umgekehrt scheint Henle geneigt, sie als selbstständige zu betrachten, vertheidigt aber auch ihre Abhängigkeit von Centralorganen, als welche die Ganglien des Sympathicus fungirten. Weder die eine noch die andere Annahme tritt mit dem von mir aufgestellten Grundsatze in Widerspruch.

§ 189. Ein dritter und, wie ich glaube, vollkommen entscheidender Grund für meine Ansicht liegt in der Art und Weise, wie das Herz auf Reize reagirt. Schon Joh. Müller machte darauf aufmerksam, dass ein localer Reiz, wie ein Nadelstich, eine allgemeine Contraction im Herzen auslöse, und bemerkte mit Recht, dass dies auf die Mitwirkung eines Centralorgans beim Pulse hindeute.

Es ist nämlich ein allgemein gültiges Gesetz, dass Reize, welche die Muskeln treffen, eine Verkürzung desjenigen Muskels, ja sogar nur desjenigen Bündels hervorrufen, auf welches der Reiz unmittelbar einwirkt. Budge behauptet freilich, dass in frischen Muskeln auch ein partieller Reiz eine allgemeine Contraction veranlasse (a. a. O. 436), aber die Richtigkeit dieser Angabe muss ich entschieden in Abrede stellen. Natürlich wird bei heftigen Reizen die gewaltsame Contraction des direct erregten Bündels wiederum zum Reize für Nachbartheile werden

können, und jeden Falls wird eine kräftige Zusammenziehung eines einzelnen Bündels die angrenzenden Fasernmassen mechanisch nach sich ziehen; aber in vorsichtig veranstalteten Experimenten ist leicht erkenntlich, dass örtliche Reize nur örtliche Wirkung haben. Reizt man einen untergeordneten Muskelast eines Nerven, so contrahirt sich anerkannter Massen nur der Theil des Muskels, in dem er sich ausbreitet; wie hätte man auch auf die Lehre von der isolirten Nervenleitung kommen können, wenn dem nicht so wäre?

Ein hinreichend irritables Herz contrahirt sich bei örtlichem Reize in allen seinen Theilen. Dies allein freilich reicht nicht aus, die Gegenwart eines Centralorgans zu erweisen. Es ist bekannt, dass das erregende Moment eines Reizes durch das Mittelglied der Nervenleitung weit über die Grenzen seiner primären Einwirkung verbreitet werden könne; so kann man z. B. durch Kneipen eines motorischen Nerven alle die Muskeln erschüttern, welche von ihm mit Fasern versorgt werden, und es wäre daher an sich nicht unmöglich, dass die Allgemeinheit der Herzcontraction, bei Anwendung örtlicher Reize, eine einfache Folge motorischer Nervenleitung wäre. Indess verbieten zwei Umstände diese Annahme auf das Entschiedenste.

1) Man kann die Pulsation durch Reizung jeder beliebigen Stelle des Herzens auslösen, und es lässt sich natürlich nicht annehmen, dass an jeder Stelle desselben ein Nerv liege, welcher von da ab zu allen Muskelbündeln seine Zweige sende. Am entscheidensten in dieser Beziehung ist die Thatsache, dass unter günstigen Umständen auch Reizung der Herzspitze die Contraction hervorruft. Es ist bekannt, dass die Nerven des Herzens an dessen Basis eintreten und von hieraus sich weiter, also auch nach der Spitze verbreiten; und ebenso bekannt ist, dass motorische Nerven nur centrifugal, nicht centripetal leiten. Unter diesen Umständen ist es vollkommen unmöglich, die allgemeine Contraction, welche auf Reizung der Herzspitze erfolgt, als einfache Reizbewegung zu betrachten.

2) Unter günstigen Umständen, d. h. bei hinreichender Irritabilität des Herzens, hat die Contraction, welche durch den örtlichen Reiz hervorgerufen wird, ihren typischen Charakter; es contrahiren sich zuerst die grossen Venenstämme, dann die Vorhöfe und schliesslich die Ventrikel. Es entsteht also nicht eine gleichzeitige Contraction, sondern es entwickeln sich verschiedene Contractionen in der Zeitfolge. Dies findet bei einfachen Reizbewegungen absolut nie statt. Selbst in den Fällen, wo die Reizung eines weit verbreiteten motorischen Nerven sehr viele Muskeln in Bewegung setzt, erfolgt die Contraction in allen gleichzeitig. Kurz, die normale Pulsation, welche nach örtlichem Reize des Herzens eintritt, ist keine einfache Reizbewegung.

Es bleibt für die Erklärung kein Ausweg übrig, als anzunehmen, dass ein Centralorgan im Spiele sei. Durch Vermittelung der Centralorgane ist allerdings möglich, nicht nur dass örtliche Reize allgemeine Bewegungen veranlassen, sondern auch dass die Bewegung ein Prozess sei, der sich in der Zeit entwickelt.

Wenn man beispielsweise bei einem geköpften Thiere das Halsmark reizt, so entsteht eine plötzliche Contraction in allen Athemmuskeln, welche vom Rückenmarke ihre Nerven erhalten. Dies ist die Form der einfachen Reizbewegung, wie sie nach Entfernung der *medulla oblongata*, als des Centralorgans der Athembewegungen, allein möglich ist. Wenn man dagegen bei einem Thiere das Gehirn mit Ausnahme des verlängerten Markes entfernt und dieses reizt, so entsteht keine plötzliche Contraction aller Athemmuskeln, sondern zunächst Verkürzung der Inspiratoren und dann der Exspiratoren; es geschieht unter dem Einflusse des zugehörigen Nervencentrums eine Entwickelung von Bewegungen in der Zeitfolge. Man kann dieselben Phänomene in einem solchen Präparate auch dadurch hervorrufen, dass man mechanisch die Schleimhaut des Kehlkopfs reizt; die Athembewegung ist dann eine reflectorische. Centripetale Nerven leiten unter diesen Umständen den örtlichen Reiz zum verlängerten Marke, und dieses reflectirt ihn, nach Massgabe einer inneren

Selbstbestimmung, durch centrifugale Nerven auf diejenigen Muskeln, welche nach organischen Zwecken sich eben bewegen sollen.

Ich behaupte nun, wie Müller, dass die Reihe von Bewegungen, welche sich nach Anwendung eines localen Reizes in den verschiedenen Abtheilungen des Herzens nach und nach entwickelt, auf einem reflectorischen Prozesse beruhe. In dem Falle, wo Berührung der Herzspitze die Pulsation hervorruft, ist diese Erklärung fast unvermeidlich. Man erwäge Folgendes. Bei Berührung der Herzspitze beginnt die Contraction nicht im Ventrikel, welcher gereizt wird, sondern in den Vorhöfen, welche nicht gereizt werden und deren Muskelbündel von denen der Kammer noch überdies gesondert sind. Da nun die Wirkung eines localen Reizes über verschiedene Muskeln nur mit Hülfe der Nervenleitung verbreitet werden kann, so ist eine Nervenwirkung im vorliegenden Falle durchaus unzweifelhaft.

Schon oben bemerkte ich, dass die Nervenwirkung, welche hier ins Spiel tritt, keine directe sein könne, d. h. es ist anatomisch unmöglich, dass die Contraction der Vorhöfe bei Berührung der Herzspitze durch Reizung eines motorischen Nerven erregt werde. Die Herznerven verlaufen nämlich von der Basis gegen die Spitze, und motorische Nerven leiten nicht rückwärts. Die Nervenleitung, die wirklich stattfand, konnte, von der Herzspitze gegen den Vorhof hin, nur durch centripetale Nerven vermittelt werden, und centripetale Nerven erregen Bewegungen nie direct, sondern indirect nach dem Prinzipe der Reflexion. Hiermit sind wir am Schlusse. Sind die Bewegungen, um die es sich hier handelt, reflectorische, so ist auch die Gegenwart eines Centralorgans unbestreitbar.

§ 190. Nach allem bisher Mitgetheilten glaube ich behaupten zu dürfen, dass die Annahme eines nervösen Centralorgans, welches die Bewegungen des Herzens regulire, eine vollkommen berechtigte sei. Besteht aber ein derartiges Organ überhaupt, so können wir es nur im Herzen selbst suchen, denn alle Ver-

hältnisse, welche die Annahme desselben erfordern, bestehen auch dann fort, wenn man das Herz ausschneidet.

Auch nach Ausschneidung des Herzens erfolgen die Pulsationen in gesetzlicher Reihenfolge und selbstständig; ferner werden auch im ausgeschnittenen Herzen die Erscheinungen wahrgenommen, welche unstreitig nur als reflectorische aufgefasst werden können. Man könnte also das Centralorgan, welches derartige Thätigkeiten möglich macht, nur dann ausserhalb des Herzens suchen, wenn sich annehmen liesse, dass seine Wirkungen länger dauerten als seine materielle Existenz. Dies wäre an und für sich nicht unmöglich, da im organischen Geschehen, wie im mechanischen, Fälle genug vorkommen, in welchen die Wirkung fortdauert, nachdem ihre Ursache schon beseitigt ist. Indess gehört der vorliegende Fall nicht zu denen, wo eine Fortdauer des Bedingten nach dem Tode des Bedingenden annehmbar ist. Unzählige Beobachtungen haben gelehrt, dass die Möglichkeit der Reflexbewegungen mit Zerstörung des Centrums, durch welches sie bedingt werden, augenblicklich aufhört; und dass alle geordneten, desgleichen alle selbstständigen Bewegungen mit Zerstörung der bezüglichen Centralorgane gleichzeitig aufhören, ist oben schon erwiesen worden. Man könnte zwar einwenden, der Darm mache auch, nachdem er aus dem Körper geschnitten worden, noch selbstständige Bewegungen, aber diese Thatsache ist hier nicht von Einfluss, da weder entschieden ist, ob jene Bewegungen wirklich selbstständig und nicht vielmehr Folgen des Luftreizes sind, noch auch erwiesen sein dürfte, dass es den ausgeschnittenen Därmen an einem Centralorgane fehle.*)

Nach dieser Sachlage ist im höchsten Grade wahrscheinlich, dass das Centralorgan der Herzbewegung im Herzen selbst liege, und leider ist der Nachweis der Wahrscheinlichkeit das Letzte, was hier erreichbar ist. Der exacte Beweis, dass ein Nerven-

*) Nach Remack lassen sich an den Därmen selbst Ganglien nachweisen, die nach vielen Analogien als Centralorgane des *motus peristalticus* betrachtet werden könnten.

centrum den selbstständigen Gang und die geordnete Verbindung gewisser Bewegungen bewerkstellige, lässt sich nur dadurch führen, dass man dieses Centrum entfernt und das unfehlbare und sofortige Verschwinden jener Ordnung und jener Selbstständigkeit empirisch nachweist. Eine Entfernung des Nervencentrums aus dem Inneren des Herzmuskels ist aber ohne Zerstörung der Theile nicht ausführbar, von welchen man eben wissen möchte, ob sie auch ohne das Centrum noch fungiren könnten.

§ 191. Giebt man zu, dass im Herzen selbst ein nervöses Centralorgan liege, und ich glaube bewiesen zu haben, dass diese Annahme durch sehr entscheidende Gründe gerechtfertigt, ja gefordert werde, so hat man die Wahl, ob man die Ganglien oder die Nervenzweige als Centra betrachten wolle. Unter diesen Umständen kann hinsichtlich der Wahl kein Zweifel sein. Die Experimentalphysiologie hat darüber längst entschieden, dass den Nervenzweigen nur die Function der Leitung zufalle, während die vergleichende Anatomie lehrt, dass die Centralorgane des Nervensystems in der ungeheuren Mehrzahl der Thiere die Form von Ganglien haben.

Die Hypothese, dass die Ganglien des Herzens als Centralorgane fungiren, lässt sich auch durch histologische Gründe unterstützen. Eine charakteristische Eigenthümlichkeit der Centralorgane ist die, Ursprungsstellen für Nerven abzugeben; und Bidder und ich haben erwiesen, dass die Ganglien der Wirbelthiere diese Eigenthümlichkeit auch haben.*) Es ist vollkommen unzweifelhaft und für die Ganglien des Herzens speziell erwiesen, dass in den Nervenknoten eine Vermehrung der Fasern stattfinde. So hatte Bidder Gelegenheit, ein Herzganglion im Verlaufe eines so dünnen Nervenzweiges zu beobachten, dass die Fasernelemente gezählt werden konnten. In diesem Falle ergaben

*) Die Selbstständigkeit des sympathischen Nervensystems von F. H. Bidder und A. W. Volkmann. Leipzig 1842. Bestätigende Beobachtungen in A. Kölliker: Die Selbstständigkeit und Abhängigkeit des symp. Nervensystems. Zürich 1844.

sich auf der einen Seite des Nerven mehr Fasern als auf der anderen. Weiter hat Bidder erwiesen, dass von einer Ganglienkugel bisweilen zwei Fasern nach einer Seite abgehen, und dieses von Ludwig und mir bestätigte Verhältniss gereicht unseren früheren Angaben zur wesentlichen Stütze. *) Endlich kann nach Becks **) und Ludwigs ***) schönen Untersuchungen, mit welchen auch Köllikers †) neueste Arbeiten übereinstimmen, kaum noch zweifelhaft sein, dass ein Theil der Ganglienkugeln des Herzens nur eine Faser nach einer Seite absendet, womit die Vermehrung der Fasern in den Ganglien direct erwiesen ist.

Budge bemerkt, meine Theorie stehe und falle mit der Erfahrung, ob aus den Ganglienkugeln zwei neue Fasern entspringen, oder ob dieselbe Faser nur durch das Ganglion hindurchtrete. ††) Ich könnte wohl fragen, wozu diese ganz überflüssige Bemerkung? Freilich wenn sich beweisen liesse, dass Fasern, welche vom Gehirn und Rückenmarke entspringen, auf der einen Seite der Ganglienkugel ein- und auf der anderen wieder austreten; weiter: wenn sich beweisen liesse, dass im Sympathicus andere Fasern als derartige nicht vorkämen, so wäre die von mir behauptete Fasernvermehrung in den Ganglien vollständig widerlegt. Aber alles Dies lässt sich nicht erweisen, ja es ist sogar der Beweis nach unseren gegenwärtigen anatomischen Hülfsmit-

---

*) F. H. Bidder: Zur Lehre vom Verhältnisse der Ganglienkörper zu den Nervenfasern. Leipzig 1847.

**) Dr. B. Beck: Ueber die Verbindung des Sehnerven mit dem Augen- und Nasenknoten, sowie über den feineren Bau dieser Ganglien. Heidelb. 1847.

***) Ludwig in Müllers Archiv 1849. S. 139. Meine eigenen Beobachtungen hatten mir schon früher das Vorkommen von Ganglienkugeln mit einfachem Faserschenkel wahrscheinlich gemacht (Anhang zu Bidders Schrift: Ueber das Verhältniss der Ganglienkörper u. s. w. S. 68), und selbst R. Wagner scheint nicht mehr abgeneigt, eine derartige Bildung, wenigstens in den Herzganglien der Frösche, einzuräumen (Handwörterbuch der Physiol. III, 461).

†) Neurologische Bemerkungen, in der Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie I. S. 135. Tafel XI.

††) Handwörterbuch der Physiologie III, 437.

teln ganz undenkbar. Umgekehrt beweisen alle die Erfahrungen, welche den Ursprung von Fasern in den Ganglien so überzeugend darthun, dass jene imaginären Anordnungen in Wirklichkeit nicht stattfinden, und gerade deshalb war Budges Bemerkung eine müssige. Indess scheint mein verehrter Freund R. Wagner einen ähnlichen Einwand zu beabsichtigen, indem er mit Bezug auf die eben erwähnte Stelle sagt: »Ich theile Budges Ansicht, dass die Lösung der Aufgabe oder der Anfang der Lösung in den anatomischen Thatsachen gesucht werden müsse; und diese Erforschung der anatomischen Thatsachen, füge ich hinzu, muss vor Allem auf das Herz gerichtet sein, wo, ich bin es fest überzeugt, der Schlüssel für alle Motive der Bewegungen, die vom Nervensystem ausgehen, liegt.«*)

Wenn dies, wie der Zusammenhang wahrscheinlich macht, heissen soll, dass die Frage über die Qualification der Ganglien zu Centralorganen und weiter die Theorie der Herzthätigkeit von den mikroskopischen Untersuchungen über die Ganglienkugeln und deren Verhältniss zu den Fasern abhänge, so kann ich mich den Wagnerschen Ansichten und Hoffnungen nicht anschliessen.

Mikroskopische Untersuchungen in diesem Gebiete werden nie zu erheblichen Aufschlüssen führen, weil selbst die bewährteste Beobachtung ein vieldeutiges Ding ist. Mit solchen Beobachtungen macht Jeder, was er will; was er mit ihnen machen darf, das hängt von schon erworbenen physiologischen Erfahrungen ab. Gesetzt, es hätte sich bestätigt, was Wagner zu beweisen suchte, dass von jeder Ganglienkugel zwei Fasernschenkel abgingen, der eine zum Centrum, der andere zur Peripherie; was hätte die Physiologie mit dieser Erfahrung gewonnen? Wagner freilich deutete diese Bildung so, dass die eine Faser vom Centrum komme, und dass die zweite, nur eine Verlängerung der ersten, zur Peripherie sich fortsetze, womit die Ganglien zu

*) Handwörterbuch der Physiologie. S. 462.

Dependenzen der Cerebrospinalnerven würden; wie aber, wenn ich vorzöge, die Ganglienkugel als Ursprungsstätte zweier divergirender Fasern und als das *primum movens* ihrer lebendigen Thätigkeit zu deuten? Unstreitig würde die Berechtigung der einen oder der anderen Auffassung nicht durch die Mikroskopie, sondern lediglich durch physiologische Erfahrungen zu ermitteln sein.

Die Annahme, dass die Herzganglien als Centralorgane fungiren, hat, so weit wir bis jetzt blickten, nichts gegen sich, vielmehr hat sie histologische und vergleichend anatomische Thatsachen entschieden für sich. Sie hat weiter für sich, dass, während die Existenz eines regulatorischen Apparates im Inneren des Herzmuskels durchaus nothwendig scheint, ein anderes Organ, welchem diese Function auch nur mit einem Scheine von Recht überwiesen werden könnte, nicht zu finden ist. Ich muss natürlich einräumen, dass für meine Hypothese noch die positiven Beweise der Experimentalphysiologie zu wünschen wären, aber ich kann nicht zugeben, dass der Mangel dieser meine Annahme verdächtige. Nicht nur die Herzganglien, sondern die Ganglien der Wirbelthiere überhaupt haben eine Lage, welche es meistens unmöglich und jeden Falls unendlich schwierig macht, entscheidende Versuche über ihre Functionen anzustellen.

§ 192. Budge hat meine Hypothese noch von einer anderen Seite angegriffen. Er stösst sich an die Vielzahl der Herzganglien und meint, es habe etwas Unbefriedigendes, ein Centralorgan anzunehmen, welches nicht aus einer Reihe zusammenhängender Theile bestehe. Ich bekenne, dass ich hier keine Schwierigkeit sehe. Da die Ganglien durch Nerven verbunden sind, so bilden sie in der That eine Reihe zusammenhängender Theile, und ich wüsste nicht, weshalb diese Form des Zusammenhangs zur Herstellung einer höheren Einheit nicht genügen sollte. In allen Articulaten und Mollusken kann die Einheit im Nervenleben auch nur durch die Nervenfäden vermittelt werden, welche die im Körper zerstreuten Ganglien in Verbindung setzen;

es ist also kein Grund anzunehmen, dass die Vielheit der Centraltheile mit der organischen Einheit ihres Wirkens im Widerspruch stehe.

Mir scheint die Vervielfältigung der Ganglien, im Vergleich zur compacten Einheit der Hirn- und Rückenmarksmassen, etwas sehr Gleichgültiges zu sein. Im Grunde besteht ja auch das Gehirn und das Rückenmark aus vielen einzelnen, nur durch Nervenfäden in Verbindung gesetzten Centralorganen; denn wenn man einen Frosch z. B. der Quere nach in drei Stücke theilt, so kommen in jedem einzelnen noch Thätigkeiten vor, welche die Wirksamkeit eines Centralorgans unwiderleglich darthun. Aber freilich werden die drei Stücke keine unter sich harmonirenden Bewegungen ausführen, auch dann nicht, wenn man, statt den Frosch in mehrere Stücke zu theilen, nur das Rückenmark an mehreren Stellen quer durchschnitt.

Man wird also annehmen müssen, dass Gehirn und Rückenmark aus mehreren Centralorganen bestehen, deren jedes für sich und bis zu einem gewissen Grade unabhängig von den übrigen seiner spezifischen Thätigkeit vorsteht, dass aber alle diese Centralorgane durch die Fasernverbindung, welche sie zusammen hält, zu einem Centralorgane einer höheren Potenz verbunden werden.

Alle diese Verhältnisse lassen sich mit Leichtigkeit auf den Bau und die Verrichtungen des Herzens übertragen. Die Ganglien sind die vereinzelten Centralorgane, welche, obschon mehr versteckt, im Gehirn und Rückenmarke auch vorkommen. Diese Centralorgane sind ebenfalls durch Nervenmasse unter einander verbunden, und der ganze Unterschied beschränkt sich darauf, dass die einzelnen Theile im Gehirn und Rückenmarke näher zusammengerückt und hierdurch in gegenseitige Berührung gekommen sind. Es ist bekannt, dass bei den Insecten gesonderte Ganglien bisweilen während der Metamorphose an einander rücken und vollständig verschmelzen, und Gall glaubte sogar das Rücken-

mark als einen Complex verschmolzener Ganglien betrachten zu müssen.

Die Erscheinungen, welche eintreten, wenn man das Herz in mehrere Stücke schneidet, sind dieser Parallele zwischen den combinirten Centralorganen der Wirbelhöhle und dem Ganglien-systeme des Herzens durchaus günstig. Wie, wenn man das Rückenmark des Frosches quer durchschneidet, der organische Zusammenhang zwischen den Bewegungen der vorderen und hinteren Körperhälfte augenblicklich aufhört, so wird auch bei einem Querschnitte durch das Herz die Harmonie des Pulses in beiden Hälften sofort aufgehoben. Gleichwohl pulsirt jede Hälfte weiter, wie auch in jeder Hälfte des durchschnittenen Frosches noch selbstständige Bewegungen (der Athemorgane und Lymph-herzen) vorkommen.

Ich glaube hiermit bewiesen zu haben, dass die grössere An-zahl von Ganglien, welche sich in einem Herzen findet, der von mir aufgestellten theoretischen Betrachtung über das Vorhanden-sein und die Unentbehrlichkeit eines regulatorischen Nervencen-trums nicht den mindesten Abbruch thut. Die Einheit im Ver-folgen gegebener Zwecke, die wir einem solchen Centralorgane allerdings vindiciren müssen, ist mit einer gewissen individuellen Selbstständigkeit seiner constituirenden Elemente sehr wohl vereinbar, und gerade die Vielheit der Ganglien macht begreif-lich, warum selbst kleine Stücke des Herzens noch Thätigkeiten vollbringen, die allen Analogien zu Folge ohne Mitwirkung eines Nervencentrums nicht zu Stande kommen könnten.

Ich bemerke schliesslich, dass die von mir aufgestellte Hypo-these neben vielen anderen Vortheilen auch den hat, die auffal-lenden Resultate zu erklären, welche bei Reizung der Herznerven von den zuverlässigsten Beobachtern gewonnen wurden. Sind die Ganglien des Herzens die Centralorgane der Bewegung, so sind sie auch die Ursprungsstätten seiner motorischen Nerven, und folglich haben die Nerven, welche vom Gehirn und Rücken-marke scheinbar zum Herzen hingehen, eine andere Bestimmung

als die den motorischen Nerven zugetheilte. In der That sieht man nie, dass Erregung der Herznerven ein Zucken der Herzmuskeln bedinge, nicht einmal bei einem derartigen Zustande der Irritabilität, wo Berührung des Herzmuskels in der That nur eine vereinzelte Contraction zur Folge hat. Dagegen versichern angesehene Beobachter, durch Reizung der Herznerven die Frequenz des Pulses gesteigert zu haben, während freilich in sehr vielen Fällen auch dieser Versuch missglückt. Dieses Schwanken der Resultate ist verständlich, wenn man annimmt, was die Hypothese zulässt, dass die Nerven, welche scheinbar zum Herzen hingehen, wenigstens theilweise vom Herzen kommen. Hat das Herz seine eigenen Centralorgane, so können Fasern, welche von diesen entspringen, im *n. vagus* und *cardiacus* peripherisch auslaufen. Die Reizung solcher Nerven würde auf die Muskeln nur indirect wirken können, nämlich durch das Mittelglied der gangliösen Centralorgane. Nun haben aber Centralorgane das Vermögen, Reize, welche auf sie einwirken, in einer gewissen Weise zu verarbeiten; sie reflectiren diese Reize nur in einzelnen Fällen ohne Weiteres auf die Muskeln; sehr häufig normiren sie dieselben in eigenthümlicher Weise und mit Bezug auf besondere organische Zwecke; nicht selten endlich absorbiren sie dieselben gänzlich, so dass der Effect des Reizes, wenigstens in der Sphäre der Bewegung, ganz verloren geht. *) Unter solchen Umständen würde dann der ungleiche Ausfall der Experimente von selbst verständlich sein.

§ 193. Während einige Physiologen die Herzbewegung als einfache Folge der Irritabilität betrachteten und von einer Unterordnung derselben unter ein nervöses Centralorgan nichts wissen wollten, gab es andere, welche die Muskelreizbarkeit selbst von einem solchen ableiteten. Diese Ansicht ist in neuerer Zeit namentlich durch M. Hall und Joh. Müller vertreten worden.

*) Das Speziellere kann hier nicht ausgeführt werden; manches hierher Bezügliche ist in meiner Abhandlung: Nervenphysiologie, in Wagners Handwörterbuche, beleuchtet worden.

Es versteht sich von selbst, dass in einem Organismus, wo Alles sich wechselseitig bedingt, auch die Irritabilität der Muskeln durch das Leben der Centralorgane bedingt sei, aber offenbar wollten jene trefflichen Forscher nicht diese unbezweifelte Wahrheit stützen, sondern eine neue Lehre begründen. Die Muskelreizbarkeit sollte von dem Leben der Centralorgane nicht etwa so abhängen, wie sie von der Thätigkeit des Magens auch abhängt, sondern anders, sie sollte ein mehr unmittelbarer Ausfluss der ersteren sein und, wie es scheint, durch ein wirkliches Einströmen des Nervenprinzips bedingt werden.

Ich halte diese Ansicht für vollkommen unhaltbar, schon deshalb, weil die Reizbarkeit vom Körper getrennter Muskeln sich erschöpfen und wieder herstellen kann. Die weiteren Gründe gegen jene Annahme sind in meiner Abhandlung über Nervenphysiologie bereits ausführlich erörtert.*) Indem ich auf diese verweise, enthalte ich mich gegenwärtig aller allgemeinen Erörterungen über die Quelle der Muskelreizbarkeit überhaupt und beschränke mich auf eine Beleuchtung solcher Versuche, durch welche man die Abhängigkeit der Irritabilität des Herzens von den grossen Nervenmassen *in specie* zu beweisen suchte.

Der Erste, welcher eine zusammenhängende Reihe von Untersuchungen über diesen Gegenstand anstellte, war Le Gallois. In seinem Werke: *Sur le principe de la vie* stellte er die Behauptung auf, dass die Quelle der Herzkraft im Rückenmarke liege. Durch jede auch nur theilweise Zerstörung dieses Organs werde die Herzkraft vermindert, aber eine vollständige Entfernung desselben vernichte dieselbe. Zwar pulsire das Herz selbst in letzterem Falle noch fort, aber mit einem solchen Minimum von Kraft, dass es die Bewegung des Blutes nicht mehr zu Stande bringe.

Es ist jetzt hinreichend bekannt, dass Le Gallois irrte. Schon

*) In gleichem Sinne wie ich hat sich Reid in seiner Abhandlung über Muskelcontractilität ausgesprochen; vergl. John Reid, *Physiological, anatomical and pathological Researches*. Edinburgh 1848. S. 1.

Wilson Philip und Flourens zeigten, dass ein Kreislauf auch nach Zerstörung des Rückenmarks möglich sei, und Bidder bewies, dass bei Fröschen selbst 11 Wochen nach jener Operation die Blutbewegung noch fortbestehe.

Demohngeachtet hat Budge die Behauptung des französischen Physiologen wieder aufgenommen, allerdings mit der Modification, dass nicht das Rückenmark im Ganzen, sondern die *medulla oblongata* die Irritabilität bedinge. Aber alle Versuche Budges beweisen mehr nicht, als dass unter den vielen Bedingungen der Herzbewegung das verlängerte Mark eben eine sei.*) Dasselbe ist von Schiffs eben erschienener Arbeit über diesen Gegenstand zu sagen.**)

Das verlängerte Mark ist nicht die *conditio sine qua non* der Herzbewegung, wie sie es für die Athembewegungen in der That ist, denn nach Zerstörung derselben dauert der Herzpuls fort, und zwar hinreichend kräftig, um den Kreislauf durchzusetzen. Das verlängerte Mark ist auch nicht die Quelle der Irritabilität des Herzens, noch der Ort, wo das motorische Prinzip seiner Nerven erzeugt wird; denn wenn man das ausgeschnittene Organ in die Kette des elektromagnetischen Apparates bringt, so erschöpft man durch längere Umdrehung des Rades seine Kraft, aber nach längerer Ruhe kommt sie wieder.

Allerdings hört das Herz nach Zerstörung der *medulla oblongata* endlich auf zu schlagen, aber dies geschieht auch, wenn man ein anderes zum Leben unerlässliches Organ ausschneidet. Budge beruft sich auf die von ihm bestätigten Versuche Bidders, dass nach Zerstörung des betreffenden Theiles der Herzschlag nur 2 Tage fortdauere; aber wenn er auch nur 2 Stunden, ja 2 Minuten fortdauerte, wäre an eine directe Abhängigkeit desselben von einem äusseren Centralorgane nicht zu denken. Uebrigens sah ich im März die Herzbewegung der Frösche noch 7 Tage

*) Budge im Archiv für physiologische Heilkunde Bd. V. und Wagners Wörterbuch Bd. III.

**) Archiv für physiol. Heilkunde 1849. S. 442.

nach vollständiger Zerstörung der gesammten Centralorgane fortdauern, und Brown-Séquard sah sogar, dass Frösche, denen im Herbst oder Winter Gehirn und *medulla oblongata* nebst einem kleinen Theile des oberen Rückenmarks genommen wurde, noch 5 Wochen lang fortlebten.*) Mit Bezug auf solche Erfahrungen sagt Schiff (a. a. O. 452), das verlängerte Mark sei unerlässliche Bedingung der längeren Fortdauer der Herzbewegung, eine Bemerkung, welche richtig, aber auf die vorliegende Frage ohne Einfluss ist.

Die *medulla oblongata* ist eine der vielen Bedingungen der Herzbewegung, aber keine der wichtigeren und nächstliegenden. Denn wenn auf die Zerstörung derselben der Tod des Herzens bald nachfolgt, so ist dies in gewisser Beziehung nur zufällig. Der Tod des Herzens erfolgt nämlich nur deshalb so bald, weil der allgemeine Tod bald eintritt, und wiederum säumt dieser nicht einzutreten, weil eine Operation, wie die hier zur Sprache gebrachte, ihre nachtheiligen Folgen gar zu weit ausbreitet. Der Schmerz der Vivisection, der Blutverlust, die Vernichtung des Athemprozesses, ferner das Verlöschen des Seelenlebens, die Störung der Verdauung und vieles andere Gewaltsame vereinigt sich, um den Organismus in seinen Grundvesten zu erschüttern, die denn so vielseitigen Angriffen auch nicht lange zu widerstehen vermögen. Das Herz stirbt also, weil die ganze Maschine zusammenbricht, nicht weil die Feder erlahmt, die seine Getriebe in Gang setzt. Dies lässt sich klar nachweisen.

Natürlich kann das verlängerte Mark seinen präsumtiven Einfluss auf's Herz nur geltend machen durch irgend welche Nerven, welche beide Organe in Verbindung setzen. Wie gross also jener Einfluss sei, kann man auch dadurch prüfen, dass man diese Nerven durchschneidet. In dieser Weise angestellt, ist der Versuch nicht nur ebenso gut, als wenn man das Mark selbst zerstört, sondern besser, indem die nachtheiligen Nebenwirkungen

*) *Comptes rendus*, 1847. I. p. 363.

vermieden werden, welche die Zerstörung eines so überaus wichtigen Theiles unvermeidlich nach sich zieht. Die *medulla oblongata* kann aber ihren belebenden Einfluss dem Herzen nur auf zwei Wegen zuführen, entweder durch Rückenmarksnerven oder durch den *vagus*.

Dass sie durch erstere keinen erheblichen Einfluss auf die Irritabilität des Herzens ausübe, beweisen die Versuche Bidders, welcher zeigte, dass nach Zerstörung des Rückenmarkes der Kreislauf der Frösche noch gegen 3 Monate lang fortbesteht. Es fragt sich also, was geschieht nach Durchschneidung des *vagus*. Kann ein Thier den Einfluss der *medulla oblongata* nur äusserst kurze Zeit entbehren, z. B. Frösche nur zwei Tage, so müssen Thiere nach Durchschneidung des *vagus* sehr schnell und selbst Frösche schon nach zwei Tagen sterben.

Dies ist bekanntlich nicht der Fall. Verschiedene Beobachter sahen erwachsene Thiere die Operation neun Tage überleben, Reid dreizehn Tage, nach welcher Zeit das Thier vollkommen wieder hergestellt schien und zu anderen Zwecken getödtet wurde; Baglivius zehn Tage, Morgagni achtzehn Tage. Ich selbst sah einen Hund, welchem Herr Professor Krahmer die herumschweifenden Nerven vor eilf Tagen getrennt hatte, vollkommen munter und das Thier hat, wie mir mein College versichert, bis zum dreiundzwanzigsten Tage gelebt. Ein Frosch, dem einer meiner Schüler die Nerven unmittelbar am Austritte aus der Schädelhöhle durchschnitten hatte, blieb achtzehn Tage lebendig, obschon die Operation in der ungünstigsten Jahreszeit, nämlich im hohen Sommer ausgeführt wurde.

Solche Erfahrungen beweisen, dass das Herz auch ohne Verbindung mit der *medulla oblongata* sehr lange reizbar bleiben könne, wobei nicht zu übersehen, dass alle Experimente, welche den Zusammenhang zwischen dem verlängerten Marke und dem Herzen aufheben, allgemeine Störungen veranlassen und folglich den Zeitraum, während dessen das isolirte Herz irritabel bleiben könnte, verkürzen müssen. Je vollständiger es gelingt, die nach-

theiligen Nebenwirkungen, welche die Zerstörung des verlängerten Markes und der Centralorgane nach sich zieht, zu eliminiren, um so länger überdauert die Irritabilität des Herzens die Operation, daher der Nutzen der künstlichen Respiration.

§ 194. Die *medulla oblongata* hat auf die Reizbarkeit des Herzens keinen bedeutenden und am wenigsten einen unmittelbaren Einfluss, dagegen hat sie eine auffallende und zwar negirende Einwirkung auf dessen Spontaneität.

E. Weber zeigte, dass, wenn das verlängerte Mark in die Kette des elektromagnetischen Apparates gebracht wird, das Herz sogleich und in erschlafftem Zustande still steht.*) Als Leiter der Nervenwirkung dienen hierbei die *n. vagi*. Werden diese zerschnitten, so kann man durch Reizung des verlängerten Markes den Pulsschlag nicht mehr hemmen, wohl aber gelingt dies, wenn man die durchschnittenen Nerven am peripherischen Ende direct reizt. Nicht sicher scheint Webers Angabe, dass der Versuch nur gelinge, wenn man beide Nerven in die Kette des elektromagnetischen Apparates bringe. Durch anhaltende Umdrehung des Rades kann man zwar eine ziemlich lange Intermittenz des Pulses bewirken, aber endlich kommt der Herzschlag auch bei fortgesetzter Reizung doch wieder.

Einfach und naturgemäss deutet E. Weber diese Erscheinungen dahin, dass die *medulla oblongata* durch Vermittelung der herumschweifenden Nerven den Puls hemme, und zwar nicht durch unmittelbare Einwirkung auf die Muskelfasern, sondern durch zeitweiliges Paralysiren derjenigen Nervenapparate, von welchen die Herzbewegungen ausgehen.

Dieser Betrachtung stellt Budge die vollkommen unhaltbare gegenüber, dass durch den übermässigen elektrischen Reiz eine Erschöpfung derselben Nerven erfolge, welche bei normaler Erregung den Herzschlag veranlassen.**) Die Unzulässigkeit dieser Annahme ergiebt sich aus folgenden Gründen:

*) Wagners Wörterbuch der Physiologie III. S. 42.

**) Wagners Wörterbuch der Physiologie III. S. 418 u. 421.

1) Die *medulla oblongata* und die herumschweifenden Nerven sind nicht die Theile, welche bei normaler Erregung den Herzschlag erhalten, wie im vorigen § ausführlich erwiesen wurde.

2) Der Stillstand des Herzens erfolgt nach Reizung des verlängerten Markes zu schnell, als dass man an eine Erschöpfung der motorischen Kraft denken könnte. Sehr gewöhnlich tritt die Pulslosigkeit mit der Reizung gleichzeitig ein, selbst bei Anwendung sehr schwacher elektrischer Kräfte, und wohl in jedem richtig angestellten Experimente cessirt der Herzschlag spätestens um einige Pulse später, als die elektrische Kette geschlossen wird.

3) Wäre die Ruhe des Herzens in den erwähnten Reizversuchen eine Folge der Erschöpfung, so müsste die Pulslosigkeit nicht nur so lange anhalten, als der Reiz fortdauerte, sondern man müsste durch anhaltendes Reizen die Erregbarkeit des Herzens vollkommen erschöpfen und jede Wiederkehr seiner Contractionen unmöglich machen können. Statt dessen findet sich bei anhaltender elektrischer Erregung der Puls nach einiger Zeit von selbst wieder ein. Hieraus ergiebt sich, dass durch die elektrische Erregung nicht die Contractilität des Herzens, sondern jene Kraft erschöpft wird, welche unter Umständen und vorübergehend die Spontaneität des Herzens lähmen kann.

4) Der Stillstand des Herzens tritt vom Beginne des Reizes an mit Erschlaffung ein, wie übrigens Budge selbst angiebt, und es ist gar nicht abzusehen, wo die Erschöpfung der motorischen Nerven herkommen soll, die doch nur Folge einer grossen Anstrengung, also im Herzen einer heftigen Contraction, sein könnte.

5) Die durch Reizung der *medulla oblongata* oder des *vagus* hervorgerufene Unthätigkeit des Herzens ist nachweislich nicht mit Erschöpfung verbunden, denn mechanische Reize veranlassen dieses unthätige Herz zu Contractionen.

Ist nun Budges Ansicht falsch, so muss Webers Ansicht richtig sein, falls nicht etwa eine dritte möglich ist. Jeden Falls werden wir bis zum Nachweis einer solchen bei der Hemmungstheorie stehen bleiben müssen, um so mehr, da sehr merkwürdige

Erfahrungen derselben direct das Wort sprechen. Nach übereinstimmenden Angaben sehr vieler Beobachter hat Durchschneidung der herumschweifenden Nerven und folglich auch Beseitigung des Einflusses, welchen das verlängerte Mark durch sie auf das Herz ausübt, eine sehr merkliche Beschleunigung des Pulses zur Folge.*) Bei den Warmblütigen dürfte dieser Effect kaum jemals fehlen, woraus sich ergiebt, dass bei ihnen das verlängerte Mark selbst unter den normalen Lebensbedingungen den Herzschlag zu beschränken pflegt. Bei den Fröschen scheint dies nicht der Fall zu sein, vielmehr machen die *vagi* oder die *medulla oblongata* ihren hemmenden Einfluss erst dann geltend, wenn sie sich in einem Zustande erhöhter Erregung befinden.

Soll die Ruhe des Herzens in den vorerwähnten Versuchen durch Hemmung bewirkt werden, so muss etwas da sein, was sich hemmen lässt. Die Webersche Auffassung findet daher eine Stütze in allen jenen Umständen, durch welche ich oben die Gegenwart eines activen Nervencentrums, als Quelle der Spontaneität des Herzens, wahrscheinlich machte. Es ist hier am Orte, auf Erscheinungen aufmerksam zu machen, welche zunächst meine Vermuthungen über die Existenz eines Centralorgans und indirect die Hemmungstheorie von Weber sehr wesentlich unterstützen.

§ 195. Wenn man das Herz eines Thieres freilegt und die Ventrikel in die Kette eines nicht zu starken elektromagnetischen Stroms bringt, so entsteht eine sehr auffallende Vermehrung der Pulsschläge. Wirkt dagegen der elektrische Strom sehr heftig, so tritt Pulslosigkeit ein, jedoch nicht mit Erschlaffung, wie nach Reizung der *vagi*, sondern mit gewaltsamer Contraction.**)

---

*) H. Jacobson, *quaestiones de vi nervorum vagorum in cordis motu. Halis Sax.* 1847. Longet, *anat. et physiol. du syst. nerveux* II. p. 314.

**) Bei grossen Thieren habe ich Letzteres nie wahrgenommen, vielmehr zeigte sich bei diesen nur ein localer Krampf in den Theilen, durch welche der Strom unmittelbar durchging, und die übrigen Partien der Kammern pulsirten um so häufiger. Es liegt dieser Unterschied wohl eben nur daran,

Es drängen sich hierbei verschiedene Fragen auf, nämlich: 1) Wie kommt es, dass ein schwacher elektromagnetischer Strom in den Herzkammern ein wechselndes Spiel von Bewegungen und nicht, so lange er dauert, anhaltende Contraction wie in allen übrigen Muskeln hervorruft? 2) Aus welchem Grunde veranlasst ein starker Strom stetigen Krampf, während ein schwacher eine Beschleunigung des Pulses hervorbringt? 3) Weshalb veranlasst die Reizung der Ventrikel andere Erscheinungen als die Reizung des *vagus*, welcher wie das Herz überhaupt, so auch die Ventrikel mit Zweigen versorgt?

Ehe ich zur Beantwortung dieser Fragen schreite, werde ich auf gewisse Vorgänge analoger Art aufmerksam machen. Wenn man einen unverletzten Frosch der Wirkung eines elektromagnetischen Stroms so aussetzt, dass dieser durch die ganze Länge des Thieres durchgeht, so zappelt er unaufhörlich, ein Beweis, dass Spannung und Erschlaffung in den Muskeln rasch wechseln. Wendet man dagegen einen kräftigen Strom an, oder zerstört man vor dem Versuche Gehirn und Rückenmark, so zappelt das Thier nicht, sondern befindet sich in einem anhaltenden Krampfe, welcher erst mit Oeffnung der Kette oder nach vollständiger Erschöpfung der Reizbarkeit schwindet. Es ist unverkennbar, dass jenes Zappeln, d. h. der Wechsel von Contraction und Remission, durch die Gegenwart der Centralorgane bedingt sei, die trotz des anhaltenden Reizes, welcher in den Muskeln allein constante Zusammenziehung bedingen würde, mit freier Selbstbestimmung über das Muskelspiel verfügen und zeitweilige Remissionen dadurch hervorbringen, dass sie dem von aussen eindringenden Impulse von innen her entgegenwirken. Nur wenn der elektrische Reiz zu heftig wird, besiegt er den Widerstand der Centralorgane und setzt den stetigen Krampf durch, welcher nach Zerstörung dieser natürlich auch in Folge geringer Reize eintritt.

---

dass bei ansehnlicher Grösse des Herzens das elektrische Agens nicht alle Theile hinreichend kräftig erregt.

Es scheint mir, dass die oben aufgeworfenen Fragen sich nun so ziemlich von selbst beantworten. Der beschleunigte Puls bei Reizung der Herzkammern durch einen schwachen Strom ist die Folge der vermehrten Erregung eines nervösen Centralorgans, ohne dessen Dasein nur stetige Contraction, nicht aber ein Wechsel von Contraction und Remission möglich wäre. Der anhaltende Krampf, in welchen die Ventrikel bei Anwendung eines starken Stroms verfallen, hat seinen Grund darin, dass der stärkere Reiz die Rückwirkung des Centralorgans zu Nichte macht. Die Reizung des *vagus* endlich, welche sich in den Ventrikeln verzweigt, hat andere Folgen als die Reizung der Ventrikel, weil er sich nicht als motorischer Nerv im Herzen ausbreitet, sondern sich als Hemmungsapparat mit dessen Centralorganen in Verbindung setzt.

Budge freilich behandelt den *vagus* als motorischen Herznerven und übersieht die entscheidenden Umstände, welche sich dieser Ansicht entgegensetzen. Wenn man einen motorischen Nerven reizt, so contrahiren sich die Muskeln, in welchen er sich ausbreitet; aber wenn man den *vagus* reizt, contrahirt sich das Herz nicht nur nicht, sondern es setzen sogar die Contractionen aus, welche sonst von selbst erfolgen, und die Erschlaffung wird eine anhaltende. Dies liegt nicht etwa daran, dass der *vagus* unter den motorischen Nerven eine exceptionelle Stellung einnimmt, denn derselbe elektromagnetische Reiz, welcher bei Application auf die Vaguswurzeln eine anhaltende Erschlaffung des Herzens herbeiführt, veranlasst in den Muskeln des Gaumens, der Speiseröhre und des Kehlkopfes eine den neurologischen Gesetzen entsprechende, nicht minder anhaltende Verkürzung. Hiermit ist erwiesen, dass der *n. vagus* zwar ein motorischer Nerv, nicht aber ein motorischer Nerv des Herzens ist.

Diese Erkenntniss, in Verbindung mit der Thatsache, dass durch Reizung des *vagus* der Herzschlag modificirt werden könne, führt, wenn ich nicht irre, nochmals zu der Nothwendigkeit, die Gegenwart eines Centralorgans im Herzen anzuerkennen. Ner-

ven, welche nicht motorischer Natur sind, können auf die Muskelbewegung nur indirecter Weise, nämlich nur durch das Mittelglied eines Nervencentrums Einfluss üben. In dieser Weise bedingen bekanntlich die sensiblen Nerven die Reflexbewegungen.

Ich nehme also an, dass der gereizte *vagus* zunächst auf die Nervencentra des Herzens wirke, und dass der nächste Grund der anhaltenden Diastole in einer veränderten Stimmung dieser Centra liege.

Cap. XIV.

Vom Pulse.

§ 196. Im Gefässsysteme der Wirbelthiere und auch einiger Wirbellosen sind alle Bedingungen zu einer Wellenbewegung des Blutes gegeben. Die Blutgefässe sind durchaus voll, die Wandungen derselben sind elastisch und das Herz pulsirt rhythmisch, so dass es seine bewegende Kraft nur während der Systole geltend macht und während der Diastole pausirt. Die sehr plötzliche Ausleerung des Blutes aus den Kammern ist die Ursache eines Stosses, welcher sich durch die Blutflüssigkeit des ganzen Gefässsystems und durch die gespannten Gefässwandungen fortsetzen muss, auch wird dieser Stoss in einer mehr oder weniger grossen Strecke der Blutkanäle als Puls wahrgenommen.

Nachdem ich in einem früheren Abschnitte die Erscheinungen und Gesetze der Wellenbewegung ausführlich behandelt habe, wird es genügen, kürzlich anzudeuten, wie dieselben Erscheinungen und dieselben Gesetze auch bei der Blutbewegung zum Vorschein kommen.

Wenn man Arterien freilegt, so sieht man, dass sie bei jedem Pulse eine geschlängelte Lage annehmen und nachmals in die ge-

rade Richtung zurückkehren; dies ist der Wechsel von Expansion und Contraction, welcher die Wellenbewegung in elastischen Schläuchen nothwendig begleitet. Noch viel evidenter wird das Vorhandensein der Wellenbewegung durch Benutzung des Kymographion. Führt man dieses Instrument in eine Arterie ein, so erhält man dieselben undulirten Curven, welche, wie oben gezeigt wurde, dann entstehen, wenn man es mit einem Gummischlauche in Verbindung bringt, durch welchen stossweise Wasser fliesst. Jeder Herzpuls producirt eine Erhebung der Curve, jede Diastole eine Senkung derselben, wenigstens in allen den Fällen, wo die Pulsation ein einfacher Vorgang und nicht durch zufällige Einwirkung von Nebenkräften gestört ist.

Alle diese Merkmale einer vorhandenen Wellenbewegung nehmen abwärts vom Herzen an Deutlichkeit ab, wie dies nach den früher erörterten Gesetzen unvermeidlich ist. Jede Expansion der Arterien coincidirt mit einem Herzstosse und jeder Herzstoss mit einer Beschleunigung des Blutstroms, was allein schon andeutet, dass auch die Blutwellen bezüglich ihrer Grösse durch die Differenzen der Stromschnelle bedingt werden. Aber ganz unzweifelhaft wird dieser Zusammenhang zwischen der Pulsgrösse einerseits und den Differenzen der Blutbewegung andererseits durch Beobachtungen, welche schon Spallanzani machte, und welche den meisten Physiologen aus eigner Erfahrung bekannt sein dürften. Wenn man mit Hülfe des Mikroskops die Blutbewegung in durchsichtigen Theilen beobachtet, so findet sich nicht nur im Allgemeinen eine Differenz der Geschwindigkeit während der Systole und Diastole des Herzens, nämlich eine raschere Bewegung während des Stosses und eine langsamere während der Pause, sondern es findet sich auch, dass diese Differenz der Geschwindigkeit ebenso wie die übrigen Merkmale des Pulses abwärts vom Herzen abnimmt und in den Haargefässen ganz unmerklich wird.

Beruht nun das Pulsiren der Arterien auf dem Entstehen von Wellen, welche durch den Herzstoss erregt werden, so muss der

Puls in den Arterienzweigen etwas später erfolgen als in den Arterienstämmen, da die Fortpflanzung der Welle eine wenn auch noch so geringe Zeit erfordert. Dies ist aber wirklich der Fall, wie schon Weitbrecht lehrte und E. H. Weber nach eigenen Untersuchungen bestätigte. *)

§ 197. Aus dem Vorhergehenden ergiebt sich bereits, dass der Herzstoss den Puls bewirke, denn unter den im Thierkörper gegebenen Bedingungen ist das Auftreten des Pulses in Folge der Systole ein physikalisch unvermeidliches. Für den Physiker bedarf es daher im Grunde keiner anderweitigen Beweise, doch ist die Experimentalphysiologie im Stande, die Abhängigkeit des Pulses von der Herzcontraction mit Strenge nachzuweisen.

Am entscheidendsten sind die Versuche mit dem Kymographion. Wenn man dieses Instrument durch eine ┬förmige Kanüle mit einer Arterie in Verbindung bringt und gleichzeitig das Herz frei legt (was bei Fischen und Amphibien leicht ausführbar ist), so zeigt sich zwischen der Curve der Pulswellen und dem Herzschlage eine Uebereinstimmung, welche jeden Zweifel an der Causalverbindung beider unterdrücken muss. Stärke und Schwäche, Frequenz und Trägheit, endlich auch ein zufälliges Aussetzen des Herzschlages sind in der Pulscurve auf das Unverkennbarste ausgedrückt. Schliesst man durch Fingerdruck die Arterie auf der centralen Seite, so fällt die Curve augenblicklich und die Wellen (die dann nur auf dem Umwege der Anastomosen zum Instrumente dringen können) werden sehr viel kleiner. Comprimirt man die Arterie sowohl auf der centralen als peripherischen Seite, so verschwinden die Wellen vollständig, und giebt man die Arterie wieder frei, so kommen gleichzeitig auch die Wellen wieder zum Vorscheine. Eine vortreffliche Modification des Versuches ist die, den *vagus* frei zu legen und in die Kette des elektromagnetischen Apparates zu bringen. Sobald dies geschieht, steht das Herz still, und in demselben Momente

*) *De pulsu, resorptione, auditu et tactu, adnotationes anat. et physiol. auctore* E. H. Weber. Lipsiae 1834. p. 5.

verwandelt sich die undulirte Curve in eine gerade Linie. Diese gerade Linie wird nun entweder so lange fortgezogen, bis man den Versuch unterbricht, oder bis das Herz trotz der fortbestehenden Reizung sein Bewegungsvermögen wieder gewinnt (§ 194). Geschieht Letzteres, so treten gleichzeitig mit den Contractionen des Herzens auch die Pulswellen wieder auf. Diese Wellen sind fast immer gross und in die Länge gezogen, wie auch der Herzpuls in diesem Falle mächtig, aber selten ist.

Auf einem ganz anderen Wege gelangte Bichat zu entsprechenden Resultaten. Er legte die Kopfschlagadern zweier Hunde frei und verband die centrale Seite der Carotis des einen Thieres mit der peripherischen des anderen. Nun pulsirte die peripherische Carotis nicht wie die übrigen Arterien des Individuums, dem sie zugehörte, sondern wie das Herz des anderen Thieres, mit dem sie in künstlicher Verbindung stand.

§ 198. Der Antheil der Arterien am Pulse beschränkt sich auf die Ausübung ihrer elastischen Kraft. Die Blutmasse, welche durch die Zusammenziehung der Ventrikel in das Arteriensystem getrieben wird, kann nicht so schnell abfliessen, als sie einströmt; sie bewirkt also eine Ausdehnung des Systems, und zwar eine ungleiche, von den Herzkammern gegen die Haargefässe allmälig abnehmende. Die verschiedenen Grade der Ausdehnung bedingen verschiedene Grade der Spannung, und diese müssen in elastischen Röhren sich ausgleichen. Auf dieser Ausgleichung beruht die Welle des Schlauches, welche, wie man sieht, einen durchaus mechanischen Ursprung hat.

Ein selbstständiges Pulsiren der Arterien, nach Analogie des selbstständigen Herzpulses, kommt nur bei Würmern, nicht aber bei Wirbelthieren vor. Diese Thatsache und nicht die anatomischen Untersuchungen über die Beschaffenheit der Arterienfaser müssen entscheiden. Mögen auch die neueren mikroskopischen Untersuchungen wieder wahrscheinlicher gemacht haben, dass die Arterienfasern, wenigstens in gewissen Schichten, zu dem Systeme des Muskelgewebes gehören, so ändert dies in

der fraglichen Angelegenheit nicht das Mindeste. Allerdings scheinen die Arterienwandungen hin und wieder mit organischen Muskelfasern ausgestattet zu sein, aber diese Fasern sind nur zu langsamen Contractionen befähigt und besitzen das Vermögen des Pulsirens bestimmt nicht.

§ 199. Einige Pathologen haben die Annahme eines selbstständigen Arterienpulses dadurch zu rechtfertigen gesucht, dass, ihrer Behauptung nach, Fälle vorkommen, wo der Rhythmus des Arterienpulses von dem des Herzens abweicht. So erzählt Zimmermann von einer Frau, an deren rechtem Arme die Arterie gewöhnlich 55 Schläge machte, während die Arterie des linken Armes 90 bis 92 Mal pulsirte.*)

Die exacteren Physiologen haben auf derartige Angaben wenig Gewicht gelegt, und wenn sie dieselben nicht aus physikalischen Gründen geradezu verwarfen, so suchten sie doch zu zeigen, wie die Wahrnehmung des Pulses von so zufälligen Umständen abhänge, dass die scheinbare Disharmonie der Schläge des Herzens und der Arterien die nothwendige Causalverbindung beider nicht verdächtigen könne. So bemerkt Rudolphi in Bezug auf Zimmermanns Beobachtung, dass der Puls am rechten Arme sehr schwach gewesen, dass also leicht eine Anzahl kleinerer Pulswellen dem tastenden Finger ganz entgehen und hiermit den Glauben veranlassen konnte, die *arteria radialis* der rechten Seite pulsire seltener als die der linken.

Zur Ausgleichung dieser Meinungsverschiedenheiten bemerke ich, dass eine Disharmonie des Arterien- und Herzpulses mit der Abhängigkeit des ersteren von dem letzteren sehr wohl bestehen könne. Dies ergiebt sich auf das Bestimmteste aus den Versuchen, welche ich über das stossweise Fliessen des Wassers in elastischen Schläuchen anstellte. Ich habe nachgewiesen, dass in Folge des Stosses, welcher Wasser in einen Schlauch treibt, ein doppeltes System von Wellen entsteht, das eine in der Flüs-

*) Zimmermann, von der Erfahrung, nach Rudolphi Grundriss der Physiologie Bd. II. Abth. 2. S. 299.

sigkeit, das andere in den elastischen Wandungen des gespannten Schlauches selbst. Diese Wellen haben nicht gleiche Geschwindigkeit, und es können also Wellen auf Wellen, d. h. mehrere Wellen in Folge eines einzigen Stosses entstehen.

Bei denjenigen Thieren, welche das Herz und die grossen Gefässstämme im Brustkasten tragen, wird die Complication noch grösser. Die Respirationsbewegungen wirken abwechselnd durch Druck und Ansaugung auf den Inhalt der grossen Gefässstämme und erzeugen ein drittes System von Wellen, welches an den Erscheinungen der Interferenz natürlich Theil nimmt und die Pulswellen ebensowohl um ein Ansehnliches vergrössern, als bis zum Unscheinbaren verkleinern kann.

Hiernach behaupte ich, dass ein Unterschied in der Zahl der Pulse, welche in einer gegebenen Zeit am Herzen und in den Arterien bemerkt werden, theoretisch keine Schwierigkeiten mache, und dass eine derartige Disharmonie den übrigens unangreifbaren Lehrsatz, dass der Arterienpuls die Wirkung des Herzstosses sei, durchaus nicht erschüttern könne.

§ 200. Einer genaueren Untersuchung würdig ist aber die Frage, ob die an Gummischläuchen gewonnenen Resultate auch auf die Arterien übertragen werden dürfen, und ob die verschiedenen Systeme von Wellen, die ich in einem todten Apparate künstlich erzeugte, durch den Einfluss der Herzcontraction auch im lebenden Thiere hervorgebracht werden? Hierüber habe ich sehr zahlreiche Experimente angestellt und werde, um zu gleicher Zeit kürzer und deutlicher zu sein, wiederum die bezüglichen Curven selbst vorlegen. *)

Tab. V. Fig. 1. Pulscurve des Hechtes *(lucius esox)* mit zugehöriger Abscisse. Das Kymographion war mit Hülfe einer ⊤förmigen Kanüle in den Stamm der Kiemenschlagader eingeführt. **) Die Zahl der grossen Wellen entspricht der Zahl der

*) Zum Verständniss derselben wird es zweckmässig sein, § 69 und 70 zu vergleichen, desgleichen die Erklärungen der Abbildungen.

**) Ebenso in den übrigen Versuchen an Fischen.

Herzpulse; die Undulationen auf den absteigenden Segmenten der Curve sind Folgen der Interferenz.

Tab. V. Fig. 2. Von demselben Thiere. Das Herz war freigelegt und erlaubte zu constatiren, dass jede Doppelwelle das Product einer einzigen Systole war. Im vorliegenden Falle ist also die Superposition der Wellen die unzweifelhafte Ursache des *pulsus dicrotus*.

Tab. V. Fig. 3. Pulscurve der Barbe *(cyprinus barbus)*. Die Erscheinungen sich kreuzender Wellen sind zwar nicht hinreichend deutlich in den Formen, aber ihr Vorhandensein ist unverkennbar. In einigen Wellen ist der absteigende Schenkel undulirt, in anderen der Gipfel geradlinig abgeschnitten.

Tab. V. Fig. 4. Pulscurve des Frosches, im Herbst gezogen. Jedes absteigende Segment lässt eine feine Undulation erkennen.

Tab. V. Fig. 5. Pulscurve des Frosches, im April gezogen, mit Benutzung eines Thieres, welches ohne Nahrung überwintert.

Tab. V. Fig. 6. Pulscurve des Frosches, im Herbst gezogen.

Tab. VI. Fig. 1. Pulscurve des Haushuhns. Hier wird der Einfluss des Athmens merklich. Die grösseren Wellen *a b c d e* sind Wellen der Respiration; die denselben superponirten kleineren gehören dem Pulse an.

Tab. VI. Fig. 2. Pulscurve des Schafes. Interessant dadurch, dass Erscheinungen der Interferenz kaum merklich sind, während sie in einer anderen Beobachtung an demselben Thiere (Fig. 5) sehr auffallend waren.

Tab. VI. Fig. 3. Pulscurven eines kleinen Spitzes. Der Einfluss der Respirationsbewegung macht sich sehr geltend. Jede Elevation der Curve ist die Wirkung eines Herzstosses; aber in mehreren Fällen ist die Thalwelle zwischen zwei Elevationen in Folge der Interferenz dermassen verkleinert, dass der tastende Finger das Auftreten eines doppelten Pulses gewiss nicht bemerkt haben würde.

Tab. VI. Fig. 4. Pulscurve eines grossen Hundes, in welcher

die Respiration sich wenig geltend macht und überhaupt Erscheinungen sich kreuzender Wellen kaum vorkommen.

Tab. VI. Fig. 5. Pulscurve des Schafes. Das Verhältniss der Wellen zum Herzstosse ist im vorliegenden Falle zweifelhaft, und gerade dieser Unklarheit wegen ist die Beobachtung merkwürdig. Professor Ludwig ist geneigt anzunehmen, dass jede Elevation (deren sich einige vierzig vorfinden) der Ausdruck eines Herzstosses sei; ich selbst halte für wahrscheinlicher, dass wir die Erscheinung des *pulsus dicrotus* vor uns haben, und dass je zwei Erhebungen (in ein Paar Fällen sogar je drei) zu einer Pulswelle gehören. Es stützt sich aber meine Ansicht nicht blos auf die Form der Wellen, welche jenen Doppelwellen ausserordentlich ähneln, die wir in Folge eines einzigen Stosses wirklich entstehen sehen (Tab. IV. Fig. 3—6 und § 61), sondern auch auf den Umstand, dass jede Doppelwelle der vorliegenden Figur annäherungsweise dieselbe Breite hat als die einfache Pulswelle in Tab. VI. Fig. 2.*) Es beziehen sich nämlich die Curven 2 und 5 nicht nur auf dasselbe Schaf, sondern sie sind auch bei derselben Geschwindigkeit des Cylinders gezogen, so dass die Abscissenabschnitte der Pulswellen in Fig. 2 einigermassen bestimmen, welche Breite eine Pulswelle in der vorliegenden Fig. 5 haben solle.

Mag nun die eine oder die andere Ansicht richtig sein, so ist klar, dass Fälle vorkommen, wo eine Disharmonie zwischen dem Pulse des Herzens und dem Pulse der Arterien eintritt. Gesetzt, wir hätten es mit einer Erscheinung der Interferenz zu thun, wie ich glaube, so täuscht uns das Kymographion, welches mehr Wellen aufzeichnet, als Herzstösse stattfanden; gesetzt dagegen, Ludwig hätte Recht, so darf man annehmen, dass bei Exploration des Pulses mit dem Finger die Täuschung eingetreten sein würde. Denn unstreitig sind einige der vorkommenden Elevationen viel zu klein, als dass das Getast sie sollte wahrnehmen können, und

*) Die auf der Abscissenlinie abgemessene Breite der Welle bestimmt deren Dauer, wie in einem früheren Abschnitte schon erörtert wurde.

man würde also beim Befühlen des Pulses weniger Schläge in der bezüglichen Arterie erhalten haben als bei Auscultation in der Herzgegend oder sogar bei Untersuchung einer anderen Arterie.

Tab. VI. Fig. 6. Pulscurve des Pferdes, von Ludwig an der Carotis erhalten. In vorliegendem Falle glaubt auch Ludwig an Doppelwellen, in Folge einfacher Herzstösse. Zu bemerken ist, dass die Ordinaten dieser Curve von der Abscisse an um das 5fache, folglich im Ganzen um das 10fache verkleinert sind. Unter solchen Umständen wird man nicht zweifeln mögen, dass ausser den grossen auch die kleinen Elevationen dem tastenden Finger fühlbar sein mussten, womit denn erwiesen sein würde, dass ein fühlbarer *pulsus dicrotus* im Gefolge einfacher Herzschläge auftreten könne.

Tab. VI. Fig. 7. Pulscurve der Katze, von Ludwig gezogen, sehr geeignet, den Unterschied der Puls- und Respirationswellen klar zu machen.

Tab. VII. Fig. 1. Isochrone Pulscurven des Hundes. Es entspricht *a b* den Pulswellen der *carotis centralis* und *α β* den Pulswellen der *carotis peripherica*. In *a b* ist der Einfluss der Respiration auf die Gestaltung der Wellen sehr auffällig. Ich besitze eine ziemliche Anzahl solcher Doppelcurven (man vergleiche Tab. VII. Fig. 1, 2, 3, 5, Tab. VIII. Fig. 2, 3, 4), welche ohne Ausnahme zeigen, dass die Respirationswellen in den kleineren Zweigen des Arteriensystems sehr bald ihren Einfluss verlieren.

Der flüchtigste Blick auf diese isochronen Curven reicht aus, sich zu überzeugen, dass die Wellenformation an verschiedenen Punkten des Arteriensystems keine ganz gleiche sei. Nicht nur die Grösse der Elevationen, sondern selbst die Zahl derselben variirt, je nach Verschiedenheit des Gefässabschnitts, in welchen das Kymographion eingeführt ist.*) Natürlich muss diese Verschiedenheit der Formation hauptsächlich von der Beschaffenheit

*) Ich muss jedoch bemerken, dass Verschiedenheiten in Bezug auf die Zahl der Elevationen weit seltener vorkommen, als nach Massgabe der Versuche, die mit Gummischläuchen angestellt wurden, erwartet werden könnte.

der Arterienwandungen abhängen, und so würde es mich kaum befremden, wenn ganz spezifische Verhältnisse des Pulses bei Entartung von Arterien local vorkommen sollten.

§ 201. Eine gewisse Disharmonie zwischen den Pulsen des Herzens und der Arterien findet also unter Umständen wirklich statt, aber dieselbe widerlegt nicht nur nicht die mechanische Auffassung des Pulses, von welcher wir ausgingen, sondern trägt im Gegentheil noch bei zu dem Beweise, dass das Pulsiren der Arterien in der That nur auf einem Prozesse der Wellenbildung beruhe, welcher durch physikalische Verhältnisse bedingt und nach physikalischen Gesetzen geregelt ist.

Aus diesem Grunde muss es also auch erlaubt sein, die Pulscurven einer weiteren mathematischen Analyse zu unterwerfen. Ich zeigte oben, dass die Höhen- und Tiefenstände der Wellen von dem Grade des Seitendrucks und somit von den Widerständen abhängen, desgleichen dass hier, wie überall, der Widerstand eine Function der Geschwindigkeit sei. Bei jedem Aufsteigen der Welle muss die Geschwindigkeit des Blutstroms wachsen, bei jedem Sinken derselben abnehmen, und die Differenz der Geschwindigkeit während Systole und Diastole muss sich nach der Formel

$$v = -\frac{b}{2a} + \sqrt{\frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2}{4} + \frac{w}{a}}$$

berechnen lassen.

Nach Versuchen an einem Hunde ergab sich für die *art. carotis* der Werth von $a = 0{,}0168$ und $b = 2{,}9275$, wenn der Widerstand w durch die Höhe einer Wassersäule ausgedrückt wurde.

Professor Ludwig theilt einen Fall mit, wo der Quecksilberdruck in der Carotis des Hundes während der Diastole 78,8 Mill. und während der Systole 149,1 Mill. betrug.*) Reduciren wir

*) Müllers Arch. für Anat. u. Physiol. 1847. S. 295. Tab. XX. Beob. 9.

den Quecksilberdruck auf Wasserdruck, so erhalten wir für die Diastole $w = 1063{,}8$, für die Systole $w = 2012{,}8$; und berechnen wir weiter für diese Drucke die Geschwindigkeiten, so erhalten wir für die Diastole $v = 179{,}2$ Mill., für die Systole $v = 269{,}8$.

Derartige Rechnungen können nur insofern einiges Interesse haben, als sie zeigen, welchen beträchtlichen Veränderungen die Stromschnelle in dem Zeitraume eines Pulses unterworfen sein kann. Hierbei ist nicht zu übersehen, dass die berechnete Differenz noch zu klein ausfällt, weil die Wellengrösse im Kymographion unter allen Umständen eine gewisse Verkleinerung erfährt. Das Quecksilber steigt während der positiven Welle nicht hinreichend hoch und fällt während der negativen nicht hinreichend tief; demnach wird der Widerstandswerth der Systole unterschätzt und der der Diastole überschätzt, woraus sich von selbst versteht, dass die für v berechneten Werthe zu wenig unterschieden sind.

§ 202. Wenn man Arterien während des Pulses mit dem Zirkel misst, so lässt sich eine Erweiterung derselben nicht wahrnehmen. Derartige Messungen haben Magendie und Parry, namentlich letzterer, mit grosser Sorgfalt angestellt. Mit Bezug auf diese Untersuchungen entstand die noch von Rudolphi vertheidigte Ansicht, dass die Arterien beim Pulse sich nicht erweiterten, und dass der fühlbare Pulsschlag nur auf einer Ortsveränderung beruhe. Dies ist ein physikalisches Missverständniss. Im Grunde beweist schon die geschlängelte Form, welche eine Arterie während des Pulses annimmt, ihre Ausdehnung, man müsste denn annehmen wollen, die Verlängerung sei mit einer entsprechenden Verengerung verbunden, wozu kein Grund vorliegt. Vollkommen entscheidend ist eine Betrachtung, welche wir in ähnlicher Weise schon oben anzustellen veranlasst waren. Die mikroskopischen Beobachtungen lehren, dass das Blut in den Haargefässen sich mit gleichmässiger Geschwindigkeit, d. h. während des Herzstosses nicht merklich schneller als während der

Pause bewege. Wenn nun während der Diastole durch die Haargefässe auch Blut abfliesst, so fliesst während der Systole offenbar nicht alles das Blut ab, welches der Ventrikel nur während der Systole den Arterien übergeben hatte. Hieraus ergiebt sich, dass während der Systole sich ein Ueberschuss von Blut in den Arterien ansammeln müsse, denn offenbar ist es nur dieser Ueberschuss, welcher die Blutbewegung in den Haargefässen auch während der Diastole möglich macht. Die Arterien sind also während der Systole ausgedehnt und zwar um so viel, als das Volumen der Blutmasse, welche während der Herzpause durch die Capillaren tritt, an Ausdehnung in Anspruch nimmt.

§ 203. Die vorstehende Betrachtung über die Ausdehnung des Arteriensystems beim Pulse führt zu einer freilich nur unvollkommenen Schätzung des Grades dieser Ausdehnung. Wir fanden, dass der linke Ventrikel eines erwachsenen Mannes mit jeder Systole im Mittel 188 Gramm. Blut entleert (§ 105), und zeigten, dass die Dauer der Systole und der Diastole im Menschen annäherungsweise sich gleich sind. Demnach würden die Haargefässe während des Zeitraums der Diastole annäherungsweise 94 Gramm. = 94 Centim. Cub. Blut entleeren, und folglich würde das Arteriensystem beim Pulse etwa um 94 Cent. Cub. erweitert werden. Da wir den cubischen Inhalt des Arteriensystems nicht einmal annäherungsweise kennen, so lässt sich die weitere Frage, um den wievielsten Theil die Arterien beim Pulse erweitert werden, von dem eben genommenen Standpunkte aus nicht beantworten.

Poisseuille hat einen Versuch angestellt, welcher nach dem Dafürhalten einiger deutschen Physiologen diese Frage erledigen soll.*) Es wurde eine metallene Kapsel in der Weise hergestellt, dass sie einer Tabaksdose glich, deren Deckel sich thürenartig um ein Gewinde bewegt. An jeder der sich gegenüberliegenden schmalen Seiten dieser Dose (um den Vergleich festzuhalten) befand sich ein Loch, ungefähr von dem Durchmesser der Carotis

*) *Magendie, Journal de physiol. exp.* T. IX. pag. 44.

eines Pferdes, und jedes dieser Löcher gehörte zur Hälfte der Schachtel, zur Hälfte dem Deckel oder der Thüre der Dose an; Poisseuille konnte also die freigelegte Kopfschlagader eines Pferdes in seiner Kapsel einschliessen, ohne das Gefäss zu comprimiren, denn dieses lag nicht nur frei in der Höhle derselben, sondern trat auch frei durch die beiden Löcher ihrer Seitenstücke.

Nun war ferner in der beweglichen Thüre der Dose ein Loch angebracht, welches mit einem Korkstöpsel wasserdicht verschlossen werden konnte, und durch den Kork war eine graduirte Glasröhre gestossen, welche demnach mit dem Inneren der metallenen Kapsel in Zusammenhang stand. Nachdem die zwischen der Arterie und der umliegenden Kapsel übrig gebliebenen offenen Stellen, desgleichen die Spalten der Thüre mit einer Mischung aus Wachs und Fett bestens verklebt worden waren, wurde die Dose, mittelst der in ihrem Deckel befindlichen Oeffnung, mit Wasser gefüllt und endlich durch den Kork, in welchem die Glasröhre befindlich war, verschlossen.

Wenn nun die Arterie beim Pulse sich ausdehnte, so stieg das Wasser in der 3 Mill. weiten Glasröhre um 70 Mill.; demnach war die Volumenzunahme des eingeschlossenen Arterienstücks gleich dem Volumen eines Cylinders von 70 Mill. Höhe und 3 Mill. Durchmesser.

Poisseuille giebt weiter an, welches Volumen einerseits die eingeschlossene Arterie und andererseits die Höhle der um sie gelagerten Kapsel hatte. Aus diesen Angaben konnte man berechnen, um welchen aliquoten Theil das bezügliche Stück Arterie sich expandirte, nur hätte man kein Gewicht darauf legen sollen, dass es sich zufällig um $\frac{1}{2}\frac{1}{3}$ expandirt hatte. Dieses Verhältniss ist nämlich nur ein zufälliges, nicht blos deshalb, weil die überschüssige Blutmasse, von welcher die Expansion abhängt, je nach dem Zufluss vom Herzen und nach dem Abfluss durch die Capillaren unzähligen Wechseln unterliegt, sondern vor Allem deshalb, weil der Grad der Ausdehnung einer Schlagader in jedem Abschnitte des Arteriensystems ein anderer ist.

Nach dem, was ich in einem früheren Abschnitte über den Verlauf der Wellen in elastischen Schläuchen aus einander gesetzt habe, ergiebt sich als nothwendig, dass die Ausdehnung der Arterien beim Pulse abwärts vom Herzen stetig abnehme. Von Aufstellung eines allgemeingültigen Ausdehnungscoëfficienten der Schlagadern kann also im Entferntesten nicht die Rede sein. Wer aber weiter nichts sucht, als was Poisseuille nachwies, nämlich wie sich die Weite einer bestimmten Arterie während des Pulses zu ihrer Weite ausser der Zeit des Pulses verhalte, der kann nicht nur leichter, sondern auch genauer zum Ziele gelangen, wenn er die Oscillationen des Hämodynamometers beobachtet. Natürlich verhalten sich die Aenderungen in der Weite der Arterien wie die Aenderungen in der Kraft des Blutdrucks, von welchem sie abhängen, und der Hämodynamometer misst eben diese Kraft, sowohl wenn der Puls wirkt, als auch wenn er nicht wirkt. Wäre der Erfinder des Hämodynamometers nicht in dem Wahne befangen gewesen, dass die Oscillationen des Queckssilbers vom Athmen abhingen, so hätte ihm die Ueberflüssigkeit seines zweiten Apparates nicht entgehen können.

§ 204. Wollte man dem Augenscheine trauen, so würden sich die Arterien beim Pulse nur der Länge nach ausdehnen, dagegen in den Querdurchmessern unveränderlich bleiben. Dies ist jedoch physikalisch unmöglich. Die Blutmasse, welche während der Systole sich in den Arterien anhäuft, muss diese in jeder Richtung ausdehnen, in welcher sie sich dem Drucke nachgiebig erweisen, also auch in der Dimension der Breite. Das Verhältniss der Breitenausdehnung zur Längenausdehnung hängt nothwendig von dem Verhältniss der Nachgiebigkeit der Zirkelfasern der Arterien einerseits und der Längenfasern andererseits ab, kann also durch physikalische Experimente am todten Thiere ermittelt werden.

Versuche über dieses Verhältniss habe ich in ziemlicher Anzahl angestellt, und zwar in folgender Weise. Ein möglichst langes Stück Arterie wurde an dem einen Ende mittels eines

eingebundenen Stöpsels wasserdicht verschlossen. In dem anderen Ende derselben wurde eine kleine messingene Röhre eingebunden, welche mit einem verschliessbaren Hahne versehen war und mit ihrer frei bleibenden Mündung an eine Injectionsspritze angesteckt werden konnte. Nach diesen Vorbereitungen wurde die Arterie nebst den in ihr befestigten Theilen gewogen. Bezeichnen wir das hierbei erhaltene Gewicht mit x. Später wurde die Arterie mit Wasser angefüllt, und zwar mit sorgfältiger Berücksichtigung, dass durchaus keine Luft im Gefässe zurückblieb, und dass die Wandungen des Gefässes keine Ausdehnung durch Druck erfuhren. Letzteres wurde dadurch verhindert, dass die gefüllte Arterie mit offenem Hahne einige Augenblicke unter Wasser gehalten wurde. Dieser Hahn wurde noch unter dem Wasser wieder geschlossen, dann nebst dem anhängenden Gefässe aus diesem herausgenommen, mit Fliesspapier abgetrocknet und abermals gewogen. Nennen wir das bei der zweiten Wägung erhaltene Gewicht y, so betrug $y - x$ die Wassermasse, welche die Arterie und den kleinen Theil der Messingröhre zwischen der Arterie und dem geschlossenen Hahne erfüllte. Da ich mich nun von dem Gewichte des Wasserquantums, welches bei jeder Injection von dem Messingröhrchen aufgenommen wurde, im Voraus vergewissert hatte, so ergab mir die Wägung mittelbar auch das Gewicht derjenigen Wassermenge, welche die Arterie allein erfüllte. Diese Wassermasse, auf ihr Volumen reducirt und mit der Länge der Arterie dividirt, ergab die Durchschnittsfläche und folglich auch den Durchmesser der Arterie in nicht ausgedehntem Zustande.

Es bezeichne F die Durchschnittsfläche, l die Länge, J den Inhalt, d den Durchmesser der Arterie, so hat man:

$$Fl = J$$

$$\frac{d^2\pi}{4} l = J$$

$$d^2\pi l = 4J$$

$$d^2 = \frac{4J}{\pi l}$$

$$\text{und folglich } d = \sqrt{\frac{4J}{\pi l}}$$

Nach Vollendung des eben beschriebenen ersten Versuches wurde die Arterie mit Hülfe des in sie eingebundenen Messingröhrchens an die Injectionsspritze gesteckt, der Hahn wurde geöffnet und Wasser gewaltsam eingespritzt. Natürlich dehnte sich hierbei das Gefäss mehr oder weniger aus. Noch während diese Ausdehnung erfolgte, wurde der Hahn verschlossen. Dann wurde wiederum das Ganze gewogen und die vermehrte Länge der Arterie gemessen. Es versteht sich aus dem Vorausgehenden von selbst, wie auf Grundlage dieser Beobachtungen nun auch der Durchmesser der ausgedehnten Arterie berechnet werden konnte.

Da ich nun die Querausdehnung nicht minder als die Längenausdehnung genau kannte, so entstand die Möglichkeit, beide Ausdehnungen zu einander in ein Verhältniss zu setzen. Ich habe dies in der Weise ausgeführt, dass ich die Vergrösserung des Durchmessers der Arterie als Einheit setzte und hiernach die Ausdehnung in der Längenrichtung in Decimalzahlen ausdrückte. Sämmtliche Versuche stimmten darin überein, dass die Längenausdehnung der Arterien, welche man mit blossen Augen so leicht wahrnimmt, relativ geringer ist als die Querausdehnung, welche selbst mit Hülfe des Zirkels nicht erkennbar ist. In den wenigen Versuchen, welche ich an Venen angestellt habe, fand jedoch ein umgekehrtes Verhältniss statt.

In nachstehender Tabelle habe ich die Resultate derartiger Beobachtungen zusammengestellt, und es wird nach dem Vorausgeschickten verständlich sein, warum ich nur die Grösse der Längenausdehnung angebe, und was es bedeute, dass die Werthe derselben, wenn sie sich auf Arterien beziehen, stets als echte Brüche auftreten.

Tabelle

über das Verhältniss der Längenausdehnung verschiedener Blutgefässe zu deren Breitenausdehnung.

Aorte eines Mannes	0,46
Aorte eines Mannes	0,43
arteria brachialis eines Mannes	0,62
Aorte eines Hundes	0,61
desgleichen	0,83
arteria iliaca eines Mannes.	0,63
Aorte des Kaninchens	0,55
arteria carotis der Ziege	0,78
arteria carotis des Rindes	0,74
vena brachialis eines Mannes	1,22
vena cava inf. des Hundes	1,36
vena iliaca eines Mannes	1,23

§ 205. Die Erfahrung bestätigt also, was nach physikalischen Grundsätzen ohnehin nicht zweifelhaft sein konnte, dass der Druck einer Flüssigkeit, welcher von innen auf die Blutgefässe wirkt, dieselben nach allen Dimensionen ausdehne. Wenn daher die Ausdehnung im Querdurchmesser beim Pulse nicht wahrnehmbar ist, so kann dies nur daran liegen, dass sie, als zu unbedeutend, nicht merkbar ist.

Dass nun wirklich die Querausdehnung einen unmerklich geringen Werth habe (natürlich absolut genommen, während sie relativ zur Längenausdehnung sehr ansehnlich ist), lässt sich mathematisch nachweisen. Poisseuille fand, wie oben angegeben wurde, dass die Carotis eines Pferdes sich um $\frac{1}{23}$ beim Pulse erweitere, ich werde aber zeigen, dass selbst eine viel grössere Erweiterung, um $\frac{1}{10}$, keine sichtbare Veränderung des Querdurchmessers nach sich ziehen würde.

Nehmen wir also an, eine Arterie von 100 Mill. Länge und 5 Mill. Durchmesser im Lichten erweitere sich beim Pulse um

$\frac{1}{10}$, und die Vergrösserung des Querdurchmessers verhalte sich zur Vergrösserung der Länge wie 10 : 7, so ist mit Bezug auf die im vorigen § entwickelte Formel zur Berechnung des Inhalts

$$\frac{\pi d^2}{4} l \,.\, \tfrac{11}{10} = \pi \frac{(d + x)^2}{4} \,.\, (100 + y)$$

wenn nämlich mit x der Zuschuss zum Durchmesser und mit y der Zuschuss zur Länge bezeichnet wird.

Nun ist aber

$$\frac{7}{10} \,.\, \frac{x}{5} = \frac{y}{100}$$

$$y = \frac{700x}{50} = 14x$$

also

$$\frac{\pi d^2}{4} l \,.\, \tfrac{11}{10} = \pi \frac{(5 + x)^2}{4} \,.\, (100 + 14x)$$

$$2750 = (25 + 10x + x^2) \,.\, (100 + 14x)$$

$$2750 = 2500 + 1000x + 100x^3 + 350x + 140x^2 + 14x^3$$

$$2750 - 2500 = 250 = 14x^3 + 240x^2 + 1350x$$

$$x^3 + \frac{120}{7} x^2 + \frac{675}{7} x - \frac{125}{7} = 0$$

Man kommt auf eine Gleichung dritten Grades, bei deren Berechnung sich $x = 0{,}171$ Millim. ergiebt. Demnach wird der Durchmesser der Arterie unter den angenommenen, besonders günstigen Umständen nur um $\frac{17}{100}$ Mill. vergrössert, ein Zuwachs, welcher, bei der Schnelligkeit der Pulsation und der ungenauen Begrenzung der Arterienwände, weder mit blossem Auge sichtbar, noch mit dem Zirkel messbar ist.

§ 206. Die Frequenz des Pulses hängt von so überaus vielen, zum Theil höchst zufälligen Umständen ab, dass die für die Heilkunde so wichtige Frage nach dem Normalpulse sich nicht mit Genauigkeit beantworten lässt. Zu den einflussreicheren Bedingungen, welche hier in Rücksicht kommen, gehören Lebensalter, Geschlecht, Leibesgrösse, Nahrungsmittel, Temperatur, Tageszeit, Zustand der Ruhe oder Thätigkeit der willkürlichen

Muskeln und Gemüthsbewegungen. Diese an sich schon ansehnliche Liste bedingender Umstände würde noch grösser ausfallen, wenn wir im Stande wären, allen jenen constitutionellen Verhältnissen, welche den Puls influenziren, bestimmte Namen zu geben.

Als Anhaltepunkt bei Beurtheilung der Pulsfrequenz wird vorzugsweise das Lebensalter benutzt. Es ist unverkennbar, dass bei jungen Leuten und namentlich bei Kindern der Puls häufiger schlägt als bei älteren Personen; dagegen ist die sehr allgemein verbreitete Annahme, dass die Pulsfrequenz mit fortschreitendem Lebensalter stetig abnehme, nicht hinreichend begründet. Bei der grossen Menge von Umständen, welche einen Einfluss auf den Puls ausüben, ist die Aufstellung mittlerer Werthe für die Pulsfrequenz verschiedener Jahrgänge nur dann möglich, wenn man über eine sehr grosse Masse von Beobachtungen gebietet. Ich habe daher, um brauchbare Mittelwerthe berechnen zu können, meine Untersuchungen über den Puls mit denen zusammengeworfen, welche Nitzsch in seiner Inauguraldissertation und Dr. Guy in Todds Encyklopädie niedergelegt haben.*) Eine solche Benutzung dreier Beobachtungsreihen zur Berechnung der fraglichen Mittelwerthe wird im vorliegenden Falle dadurch gerechtfertigt, dass die Methode der Beobachtung in allen dieselbe war, indem die Pulszählungen nur bei gesunden, körperlich nicht angestrengten und sitzenden Personen vor dem Mittagsmahle angestellt wurden.

Da Guy und Nitzsch nicht nur die Werthe der mittleren Pulsfrequenz, sondern auch die Anzahl ihrer Beobachtungen angaben, so hatte die Berechnung der Mittelwerthe, die ihren und meinen Beobachtungen entsprachen und welche im Folgenden mit P bezeichnet werden mögen, keine Schwierigkeit. Hat nämlich ein Beobachter in z Fällen eine mittlere Pulsfrequenz $= p$

*) Vergl. Nitzsch, *de ratione inter pulsus frequentiam et corporis altitudinem habita, Halae* 1849 und Dr. Guy in: *The cyclopaedia of anat. and physiol. by* R. Todd *art. pulse.*

gefunden und ein zweiter in z' Fällen eine Frequenz $= p'$ ermittelt, so ist

$$\frac{z \,.\, p + z' \,.\, p'}{z + z'} = P$$

Die in nachstehender Tabelle verzeichneten Mittelwerthe des Pulses sind mit Hülfe dieser Formel aus den schon erwähnten 3 Beobachtungsreihen abgeleitet. Es stützt sich daher die Pulsfrequenz, die wir einem gewissen Lebensalter zuschreiben, in der Mehrzahl der Fälle auf eine sehr ansehnliche Menge von Beobachtungen, sowohl an männlichen als an weiblichen Individuen, worüber die letzte Columne der Tabelle Aufschluss giebt.

Tabelle

über die Pulsfrequenz in verschiedenen Lebensaltern.

Lebensjahr	Pulsfrequenz			Schwankung	Zahl der Beobachtungen.
	maximum	*minimum*	Mittel		
0— 1	160	101	134	59	59
1— 2	136	84	110,6	52	33
2— 3	134	84	108	50	48
3— 4	124	80	108	44	63
4— 5	133	80	103	53	94
5— 6	128	70	98	58	56
6— 7	128	72	93	56	42
7— 8	112	72	94	40	39
8— 9	114	72	89	42	48
9—10	120	68	90,6	52	47
10—11	106	56	87	50	73
11—12	120	60	89	60	75
12—13	112	67	88	45	107
13—14	114	66	87	48	80
14—15	112	60	82	52	71
15—16	112	66	83	46	77
16—17	108	54	79,7	54	54
17—18	104	54	76	50	67
18—19	108	60	77	48	48
19—20	106	52	74	54	57

Lebensjahr	Pulsfrequenz *maximum*	Pulsfrequenz *minimum*	Pulsfrequenz Mittel	Schwankung	Zahl der Beobachtungen.
20—21	99	59	71	40	67
21—22	96	41	71	55	54
22—23	100	56	70	44	63
23—24	96	50	71	46	60
24—25	96	50	72	46	44
25—30	102	52	72	50	180
30—35	104	58	70*)	46	125
35—40	100	56	72	44	144
40—45	104	50	72	54	105
45—50	100	49	72	51	102
50—55	94	52	72	42	42
55—60	108	48	75	60	58
60—65	100	54	73	46	60
65—70	96	52	75	44	51
70—75	104	54	75	50	44
75—80	94	50	72	44	44
80 u. mehr	98	63	79	35	31

Diese Tabelle beweist, dass der Einfluss des Alters auf die Pulsfrequenz ein anderer ist, als von der Mehrzahl der Physiologen bisher angenommen wurde. Es ist nicht richtig, dass die Zahl der Pulsschläge mit zunehmendem Alter stetig abnehme, sondern die Abnahme erfolgt nur bis zum zwanzigsten Lebensjahre. Zwischen zwanzig und vierundzwanzig Jahren befindet sich die Pulsfrequenz in ihrem Minimum mit ungefähr 71 Schlägen, sie hebt sich dann fast unmerklich, nämlich in dem langen Zeitraume vom vierundzwanzigsten bis fünfundfunfzigsten Jahre auf 72, von da ab auf 75 und jenseits des achtzigsten Lebensjahres auf 79.

Dieses Steigen des Pulses im höheren Lebensalter ist auch

*) Mit ziemlicher Wahrscheinlichkeit kann auch hier 72 angenommen werden. Es befinden sich nämlich unter dieser Altersclasse 61 Sträflinge des hiesigen Zuchthauses, welche, wie unten zu zeigen, einen seltenen Puls haben.

von anderen Seiten beobachtet worden. Dr. Pennock fand bei 373 Personen, deren mittleres Lebensalter siebenundsechzig Jahr betrug, eine mittlere Pulsfrequenz von 75 Schlägen, und nach den Angaben französischer Beobachter, welche Guy anführt (a. a. O. 183), war bei einundsiebenzigjährigen Individuen die Pulsfrequenz in 61 Fällen im Mittel 76. Diese Zahlen sind mit denen in meiner Tabelle aufgeführten vollkommen in Uebereinstimmung.

§ 207. Nach Rameaux nimmt die Pulsfrequenz ab, wenn die Körperlänge zunimmt. Allerdings bedarf diese Angabe noch der Bestätigung, da der französische Gelehrte sich nur auf eine geringe Anzahl von Beobachtungen stützt, die überdies nur an Soldaten, also an Individuen angestellt waren, welche in Bezug auf Alter und Körperlänge sich muthmasslich sehr nahe standen.

Steht die Körperlänge wirklich in einem umgekehrten Verhältnisse zur Pulsfrequenz, so müssen Menschen von gleichem Alter, aber ungleicher Grösse einen verschiedenen Puls zeigen, die kleineren Individuen einen häufigeren, die grösseren einen selteneren. Ich habe die von Nitzsch und von mir angestellten Beobachtungen in nachstehender Tabelle so zusammengestellt, dass der Einfluss der Körperlänge in der eben angedeuteten Weise zum Vorschein kommt. Für jede Altersclasse finden sich in der Tabelle zwei Abtheilungen, deren eine, *A*, die kleineren, die andere, *B*, die grösseren Individuen umfasst, und für jede dieser Abtheilungen ist der mittlere Werth des Pulses in der nebenstehenden Columne angegeben. Schliesslich ist für jede Altersclasse die Zahl der in Rechnung genommenen Fälle angeführt.

Tabelle

über den Einfluss der Körperlänge auf die Pulsfrequenz bei Gleichheit der Lebensalter.

Lebens-jahr	Classe *A*	Puls	Classe *B*	Puls	Zahl der Beobach-tungen
1	459— 538 Mill.	146,5	538— 750 Mill.	123,1	37
2	715— 766 »	124	772— 847 »	111	11
3	785— 872 »	113,2	878— 950 »	104,3	24
4	814— 930 »	111,7	930— 991 »	110,2	39
5	785—1000 »	106	1000—1155 »	102,3	68
6	950—1040 »	102,5	1040—1150 »	99,9	20
7	1064—1145 »	101	1145—1295 »	93,8	20
8	1070—1174 »	97	1180—1280 »	98	16
9	1115—1236 »	90	1250—1427 »	89	27
10	1194—1260 »	93	1268—1451 »	88	25
11	1170—1320 »	88,5	1320—1495 »	85,9	51
12	1224—1370 »	91,3	1376—1467 »	81	50
13	1112—1420 »	87,6	1420—1562 »	89,3	86
14	1328—1448 »	89,5	1448—1720 »	86,6	56
15	1121—1526 »	81	1350—1631 »	81	48
16	1336—1560 »	81,6	1560—1780 »	84,4	55
17	1435—1608 »	80,4	1626—1812 »	82,9	31
18	1485—1656 »	76,2	1663—2125 »	75,7	48
19	1455—1700 »	76	1702—2183 »	78,7	26
20	1428—1668 »	77	1670—1942 »	73	35
21	1499—1690 »	76,6	1702—1992 »	73	46
22	1464—1702 »	75	1705—1992 »	71	33
23	1467—1740 »	69,6	1741—1972 »	71,2	35
24	1461—1656 »	73	1668—1956 »	71	38
25	1460—1689 »	75	1704—1966 »	65	22
25—30	1383—1645 »	71,6	1648—1835 »	70,3	107
30—35	1466—1689 »	68,7	? —1836 »	64,1	61
35—40	1400—1646 »	72,3	1647—1822 »	68	62
40—45	1520—1660 »	72,4	1665—1765 »	66,5	42
45—50	1400—1700 »	74	1702—1930 »	72	46
50—55	1481—1616 »	73,1	1625—1714 »	64	14
55—60	1444—1620 »	76,3	1623—1808 »	75,4	14
60—65	1501—1630 »	78	1630—1800 »	75,4	19

Aus dieser Zusammenstellung der Thatsachen ergiebt sich, dass bei gleichem Alter die grösseren Individuen in der Regel den selteneren Puls haben. Sonderbar ist, dass die wenigen Ausnahmen, welche vorkommen, in die kurze Periode des Jünglingsalters zusammenfallen.

§ 208. Rameaux glaubte das Verhältniss der Pulsfrequenz zur Körperlänge nach einer Formel berechnen zu können. Seiner Angabe zu Folge sollen sich die Pulsfrequenzen verschiedener Personen im Mittel umgekehrt wie die Quadratwurzeln der Körperlängen verhalten. Nach meinen Beobachtungen ist dies nicht richtig, indem alle Individuen, deren Körper unter der Mittelgrösse der Erwachsenen bleibt, einen häufigeren Puls haben, als die Formel ausweist. Bei kleinen Kindern ist die Differenz der beobachteten und berechneten Werthe sogar sehr beträchtlich, wie beispielsweise die Pulsfrequenz für Knaben von 5 Jahren und 974 Millim. mittlerer Körperlänge von Rameaux zu 91 Schlägen berechnet wird, während sie im Mittel von 68 Beobachtungen 106 betrug.

Der Wahrheit viel näher kommt man mit der Annahme, dass sich die Pulsfrequenzen umgekehrt wie die $\frac{5}{9}$ Potenzen der Körperlängen verhalten. Bezeichnet man also die Pulsfrequenz mit p und die Körperlänge mit l, so verhält sich im Mittel vieler Beobachtungen und annäherungsweise

$$p : p' = l'^{\frac{5}{9}} : l^{\frac{5}{9}}$$

Um diese Behauptung zu rechtfertigen, habe ich die nachstehende Tabelle entworfen, welche die beobachteten und berechneten Werthe der Pulsfrequenz neben einander stellt. *)

*) Die Rechnung geht von der Annahme aus, dass zu einer Körperlänge von 1550 Millim. 77,8 Pulsschläge gehören, eine Annahme, welche auf 214 Beobachtungen fusst. Ferner wird eine Körperlänge von 500—600, 600—700 Mill. u. s. w. mit 550, 650 Mill. u. s. w. in Rechnung gebracht.

Tabelle

zur Erläuterung des gesetzlichen Zusammenhanges zwischen Körperlänge und Pulsfrequenz.

mittlere Körperlänge in Millim.	Pulsfrequenz beobachtet	Pulsfrequenz berechnet	Zahl der Beobachtungen
unter 500	151,5	149,2	4
500— 600	139,8	138,3	23
600— 700	126,6	126,1	6
700— 800	116,5	116,4	25
800— 900	110,9	108,6	36
900—1000	106,6	102,1	64
1000—1100	101,5	96,6	70
1100—1200	93,6	91,8	46
1200—1300	92,2	87,6	78
1300—1400	87,7	84	121
1400—1500	85,1	80,7	155
1500—1600	77,8	77,8	214
1600—1700	73,2*)	75	338
1700—1800	71,9	72,5	—
1800—1900	72,5	70,5	32
1900—2000	73,4**)	68,5	36
über 2000	71,2	66,6	4

§ 209. Aus der mitgetheilten Tabelle ergiebt sich, dass der Einfluss der Leibesgrösse auf die Pulsfrequenz von Guy mit Unrecht in Zweifel gezogen wurde. Im Grunde liess sich ein solches Verhältniss schon aus vergleichend physiologischen Erfahrungen erwarten, denn auch unter den Säugethieren haben die grösseren Arten einen seltenen Puls, die kleineren einen häufigen. So

*) Wahrscheinlicher gegen 74; vergl. unten § 210.

**) Die etwas zu hohe Zahl ist dadurch erklärlich, dass lauter junge, höchst kräftige Subjecte der Potsdamer Garde in Rechnung gebracht sind.

beträgt die Pulsfrequenz des Pferdes gegen 40 Schläge, die des Schafes 60—80, die des Hundes 100—120, die des Kaninchens gegen 150, aber die des Eichhörnchens nach einer Beobachtung von Young über 500 in einer Minute.

Wenn nun von der empirischen Seite die Abhängigkeit des menschlichen Pulses von der Leibesgrösse nichts Anstössiges hat, so lässt sich sogar theoretisch nachweisen, dass ein umgekehrtes Verhältniss zwischen Körpermasse und Pulszahl erwartet werden musste. Je grösser nämlich das Herz wird, um so unfähiger wird es zur Entleerung der in ihm enthaltenen Blutmasse. Wir werden annäherungsweise annehmen dürfen, dass mit zunehmender Körperlänge auch die Muskeln entsprechend wachsen, nicht nur in der Dimension der Länge, sondern auch im Querdurchmesser. Da nun die Kräfte der Muskeln sich wie deren Querschnitte verhalten, so muss mit Zunahme der Körpergrösse die Muskelkraft in quadratischem Verhältnisse zunehmen, und diese natürlich nur approximative Schätzung gilt, wie für alle Muskeln, so auch für das Herz. Während also mit zunehmender Körperlänge die Herzkraft in quadratischem Verhältnisse steigt, wächst das Volumen der Herzhöhle und folglich die zu bewegende Blutmasse cubisch, woraus von selbst erhellt, dass jene zu kurz kommt. Nun kann aber ein Defect der bewegenden Kraft nicht ohne Trägheit im Bewegen bleiben, und das grössere Herz contrahirt sich also langsamer und eben darum seltener, weil die ihm zugemuthete Leistung eine unverhältnissmässig schwere ist.

Nach dem Vorausgeschickten könnte zweifelhaft scheinen, ob das Lebensalter aus inneren Gründen auf den Puls wirke, oder nur aus dem äusserlichen, dass verschiedene Lebensepochen sich mit verschiedenen Körperlängen verbinden. Die § 206 mitgetheilte Tabelle beweist nämlich, dass von der Zeit an, wo der Körper seine volle Grösse erreicht hat, die Pulsfrequenz eine unveränderliche Grösse bildet und nur gegen das Lebensende ein wenig wächst, wo auch die Körperlänge ein wenig abnimmt.

Um diese Zweifel aufzuklären, habe ich meine Beobachtungen

in der Weise zusammengestellt, dass ich Individuen gleicher Grösse in zwei Altersclassen theile. Die erste, *A*, umfasst die jüngeren Individuen, die zweite, *B*, die älteren, und für jede dieser Abtheilungen ist die mittlere Pulsfrequenz ausgerechnet und in der nebenstehenden Columne der Tabelle angegeben.

Tabelle

zur Entscheidung der Frage, ob Altersverschiedenheiten in Menschen von gleicher Körperlänge auf den Puls wirken.

mittlere Körperlänge	Classe *A*	Puls	Classe *B*	Puls	Zahl der Beobachtungen
1025 Mill.	$3\frac{3}{4}$ — 5 Jahr	103,3	5 — 7 Jahr	104	42
1075 »	5 — 6 »	99,4	6 — 9 »	95,6	21
1125 »	$5\frac{1}{2}$ — 7 »	101,3	7 — 13 »	89,1	22
1175 »	5 — 8 »	95	8 — 13 »	89,2	24
1225 »	$6\frac{1}{2}$ — $9\frac{1}{2}$ »	99,2	$9\frac{3}{4}$ — 12 »	91,7	33
1275 »	7 — 11 »	90,1	11 — 88 »	89,8	45
1325 »	$8\frac{3}{4}$ — $11\frac{1}{2}$ »	88,8	12 — 16 »	87,5	60
1375 »	10 — 13 »	87	13 — 72 »	87	62
1425 »	9 — 13 »	86,2	14 — 70 »	85,1	75
1475 »	10 — $14\frac{1}{2}$ »	88,5	15 — 73 »	80,7	80
1525 »	$10\frac{3}{4}$ — 19 »	84,4	20 — 74 »	76,7	85
1575 »	13 — 24 »	81,2	25 — 80 »	74,9	89
1625 »	14 — 19 »	75,3	30 — 76 »	70,5	184
1675 »	14 — 22 »	80	23 — 70 »	74	102
1725 »	14 — 23 »	75,3	24 — 69 »	79,6	82
1775 »	14 — 23 »	71,3	23 — 77 »	70,3	40

Die vorstehende Tabelle liefert den vollständigen Beweis, dass das Lebensalter nicht nur durch Vermittelung der Körpergrössen, sondern auch noch in anderer Weise auf den Puls wirke. Die Classe der Jüngeren zeigt fast ohne Ausnahme eine merklich grössere Pulsfrequenz als die Classe der Aelteren, was hauptsächlich davon abhängen dürfte, dass erstere die Individuen umfasst, welche sich durch das kräftigste Wachsthum auszeichnen. Starkes Wachsthum und starker Stoffwechsel sind unzertrennlich

verbunden, und dass letzterer sich mit einem häufigeren Pulse zu verbinden pflege, ist aus zahlreichen physiologischen und pathologischen Erfahrungen hinreichend bekannt.

Es scheint nicht überflüssig, vor einem falschen Schlusse zu warnen, den man machen würde, wenn man aus der mitgetheilten Tabelle ein Trägerwerden des Pulses durch den Einfluss der Jahre ableitete. Die verminderte Pulsfrequenz der Classe *B* kann wie bemerkt davon abhängen, dass sie diejenigen Individuen umfasst, die weniger wachsen, und es ist möglich, dass der Unterschied der Pulsfrequenz in beiden Classen auf diesem Momente allein beruhe. Ob das zunehmende Alter einen deprimirenden Einfluss auf den Puls ausübe, würde sich erst beurtheilen lassen, wenn man Erwachsene von gleicher Grösse in verschiedene Altersclassen sonderte. Meine Erfahrungen sind noch zu lückenhaft, um eine Zusammenstellung der Art zuzulassen, indess ist nicht zu übersehen, dass die § 206 mitgetheilte Tabelle bereits die wahrscheinliche Antwort liefert. In der Tabelle finden sich unter andern auch die Altersclassen der Erwachsenen, und wenn auch in diesen Classen die Gleichheit der Körpergrösse nicht berücksichtigt ist, so müssen doch in der Masse der Fälle die Einflüsse der Körperlängen sich ausgleichen. Wenn nun der Tabelle zu Folge die mittlere Pulsfrequenz zwischen dem vierundzwanzigsten und fünfundfunfzigsten Jahre sich nicht ändert, so wird dies kaum anders zu deuten sein, als dass das Altwerden des Körpers einen unmittelbaren Einfluss auf den Herzschlag nicht ausübe.

§ 210. Eine sehr auffallende Einwirkung auf die Pulsfrequenz haben die Nahrungsmittel. Bald nach der Mittagsmahlzeit fand ich den Puls oft um 10—15 Schläge beschleunigt, und bei Hungercuren sinkt derselbe nicht selten unter 40. Ich habe eine interessante Gelegenheit gehabt, den Einfluss der Kost im Grossen zu beobachten, und will die gewonnenen Resultate um so weniger zurückhalten, als sie zur vollständigen Beurtheilung der oben vorgelegten Tabellen kaum entbehrlich sind. Es ist mir gestattet

worden, Beobachtungen an den Gefangenen des Zuchthauses zu Halle anzustellen, welche von der Anstalt nur vegetabilische Kost erhalten und demnach den Fleischgenuss fast gänzlich entbehren. Die Pulsfrequenz dieser Leute liegt um ein Ansehnliches unter dem mittleren oder Normalpulse, wie aus der folgenden Zusammenstellung der beobachteten Werthe anschaulich wird.

Tabelle

zur Beurtheilung des Einflusses, welchen eine anhaltend vegetabilische Kost auf die Pulsfrequenz ausübt.

Körperlänge	Normalpuls	Puls der Sträflinge bei vegetabil. Kost	Zahl der Beobachtungen an Sträflingen
1525 Mill.	81	69	6
1575 »	76	70,8	32
1625 »	72,8	67,4	78
1675 »	73	66,7	65
1725 »	72,6	66,7	63
1775 »	69,6	70	7

Ich habe hierbei zu bemerken, dass die unter der Ueberschrift Normalpuls gegebenen Werthe auf Beobachtungen beruhen, welche die an den Sträflingen gemachten mit einschliessen. Es entsteht demnach die Frage, ob das, was ich Normalpuls genannt habe, als brauchbarer Mittelwerth gelten könne, oder ob derselbe durch das Mitzählen der Sträflinge beschränkt und unter die wahre Mitte herabgedrückt sei.

Ich vermuthe, dass in der Grössenclasse von 1625 Mill. eine derartige Unterschätzung des Normalpulses wirklich eingetreten sei, einerseits, weil 78 hierher gehörige Sträflinge nahezu die Hälfte der Individuen ausmachten, welche bei Berechnung des mittleren Pulses überhaupt berücksichtigt wurden, andererseits, weil die Zahl 72,8 als zu niedrig aus der Reihe fällt. Ich würde geneigt sein, für 72,8 Pulse 74 anzunehmen.

Im Uebrigen glaube ich nicht, dass die Berücksichtigung der Sträflinge bei Berechnung des Normalpulses zu falschen Resultaten geführt habe. Man muss erwägen, dass die armen Classen, welche bei Aufstellung eines Normalpulses nicht minder zählen als die Wohlhabenden, zum grössten Theile nicht besser genährt sind als die Gefangenen einer preussischen Strafanstalt, sondern oft schlechter. Hierzu kommt, dass meine Beobachtungen in den Grössenclassen von 1575 bis 1775 Mill. fast ausschliesslich an Personen der wohlhabenderen Stände gemacht sind, so dass die in Rechnung genommenen Sträflinge für die nicht gehörig berücksichtigten Armen eintreten.

§ 211. Sehr allgemein wird angegeben, dass der Puls des weiblichen Geschlechtes häufiger sei als der des männlichen. Die Thatsache ist unbestreitbar, aber ihre Deutung zweifelhaft. Es fragt sich nämlich, ob der häufigere Puls der Frauen nur von ihrem kleineren Körperbaue oder von anderen Verhältnissen abhänge, welche mit der geschlechtlichen Constitution in näherer Beziehung stehen. Um diese Frage zu entscheiden, vergleiche ich im Folgenden die beiden Geschlechter bei gleichen Körperlängen.

Tabelle

über den Einfluss des Geschlechtes auf Pulsfrequenz.

Körperlänge	männliches Geschlecht		weibl. Geschlecht	
	Puls	Zahl der Beobachtungen	Puls	Zahl der Beobachtungen
525 Mill.	158	5	144	12
825 »	114,5	8	118	6
875 »	110	15	107,1	10
925 »	109	17	109,8	17
975 »	101,3	17	105,9	17
1025 »	102,2	25	105,8	17
1075 »	97,2	14	98,3	7
1125 »	93,2	12	97,6	10

Körperlänge	männliches Geschlecht		weibl. Geschlecht	
	Puls	Zahl der Beobachtungen	Puls	Zahl der Beobachtungen
1175 Mill.	90,7	14	94	12
1225 »	94,9	19	95,8	14
1275 »	87,9	31	95	14
1325 »	86,7	47	93,5	13
1375 »	87	52	86,9	10
1425 »	84,9	59	88,5	16
1475 »	85,4	55	83,6	25
1525 »	79,9	48	80,9	37
1575 »	75	91	77	44
1625 »	71,7*)	140	77,4	28

Diese Beobachtungen beweisen, dass das weibliche Geschlecht nicht blos in Folge seiner geringeren Körperlänge, sondern auch aus anderen constitutionellen Verhältnissen zu einem häufigeren Pulse hinneigt. Ich vermuthe, dass die grössere Pulsfrequenz auf der Seite der Frauen auch in diesem Falle mit dem Prozesse des Wachsthums und Stoffwechsels zusammenhänge. Abstrahiren wir von den 3 letzten Grössenclassen, so fallen die übrigen sämmtlich in die Periode des Wachsthums, und die Entwickelung der Frauen geht schneller vor sich als die der Männer.

Sehr günstig für diese Betrachtung ist der Umstand, dass bei 1525 und 1575 Mill. Körperlänge die Pulsfrequenz der männlichen Individuen die der weiblichen fast einholt, denn nun tritt im Wachsthum des weiblichen Körpers allmälig Stillstand ein, während der Jüngling noch fortwächst. Bei 1625 Mill. Körperlänge ist freilich die Pulsfrequenz der Männer wieder beträchtlich im Rückstande; indess ist die Beobachtung verdächtig, indem der Puls der männlichen Individuen sicherlich zu niedrig und der des weiblichen Geschlechtes höchst wahrscheinlich zu hoch notirt ist.

*) Unstreitig zu kleiner Werth, da unter den 140 männlichen Individuen, welche in Rechnung kommen, sich 78 Sträflinge befinden; s. § 210.

Nicht unbemerkt bleibe, dass die eben gewonnenen Resultate einigen Einfluss auf die § 208 mitgetheilte Tabelle ausüben, in welcher die zu bestimmten Körperlängen gehörigen mittleren Pulsfrequenzen verzeichnet sind. In allen Fällen, wo unverhältnissmässig mehr Männer als Frauen zur Berechnung der Pulsfrequenz benutzt wurden, ist der Werth dieser etwas zu niedrig notirt und bedarf einer kleinen Correctur, welche nach dem Mitgetheilten nicht schwierig ist.

§ 212. Obschon im Vorhergehenden nur der kleinere Theil der Bedingungen erörtert worden ist, welche auf den Herzschlag Einfluss haben, so muss doch klar sein, dass die Pulsfrequenz, besonders wenn es sich um einzelne Fälle handelt, sich jeder genaueren Schätzung entzieht. Die § 206 mitgetheilte Tabelle zeigt, dass die Pulsfrequenzen gesunder Individuen von gleichem Alter, welche, abgesehen von ihren Nahrungsmitteln, sich unter sehr ähnlichen äusseren Bedingungen befanden, um mehr als 50 Schläge in einer Minute von einander abweichen können. Diese enormen Schwankungen werden zwar um ein Merkliches geringer, wenn man statt des Alters die Körperlänge berücksichtigt, aber auch unter Personen von gleichem Längenmasse kommen so bedeutende Abweichungen des Pulses von den Mittelwerthen vor, wie sie in anderen Fällen nur als Folgen von Entzündungen, Fiebern, Herzfehlern u. s. w. auftreten.

Die praktischen Aerzte werden wohl thun, diese Erfahrungen zu berücksichtigen. Das Zählen des Pulses bei Menschen, deren Puls man nicht schon genau kennt, ist für die Erkenntniss und Behandlung der Krankheiten vollkommen werthlos, und die Benutzung der Secundenuhr am Krankenbette wird zur Charlatanerie, wenn man sich nicht die Mühe giebt, nach den zahlreichen Umständen zu fragen, von welchen die Pulsfrequenz in so auffallendem Masse abhängig ist.

§ 213. Die Pathologen unterscheiden zwischen häufigem und schnellem Pulse und behaupten hiermit, dass nicht jeder häufige Puls schnell und nicht jeder seltene langsam sein müsse. Die

Frage, wie ein seltener Puls schnell sein könne, ist meines Wissens mit Schärfe noch nie erörtert worden, sondern man hat nur darauf hingewiesen, die Häufigkeit des Pulses beziehe sich auf die Zahl der Schläge in einer gegebenen Zeit, die Schnelligkeit dagegen auf die Dauer der Contraction, womit allem Anscheine nach behauptet werden sollte, dass ein Puls, der selten wiederkehre *(pulsus rarus)*, immerhin mit einer raschen Contraction der Arterien verbunden sein könne *(pulsus celer)*.

Diese Vorstellung ist unrichtig. Unter allen Umständen dauert die Contraction der Arterie so lange, als der Zeitraum vom Ende einer Systole bis zum Anfange der nächstfolgenden. Der Grund hiervon liegt darin, dass die Arterien sich in einem Zustande der Spannung befinden, welcher diejenige der Venen ausserordentlich übertrifft. Die vollständige Ausgleichung dieser Spannungsdifferenz würde eine ansehnliche Zeit in Anspruch nehmen, und da die Contraction eben nur in Folge des Ausgleichungsstrebens eintritt, so versteht sich von selbst, dass dieselbe im Intervall eines Pulses, auch wenn derselbe noch so träge ginge, nie zu Ende komme. Hiervon kann man sich vollkommen überzeugen, wenn man am Hämodynamometer beobachtet. Nämlich jedes Mal, wenn der Puls intermittirt, also eine Systole ausfüllt, dauert das Sinken des Quecksilbers fort bis zum Eintritte des wiederkehrenden Pulses, und nach früheren Auseinandersetzungen kann kein Zweifel sein, dass das Sinken des Quecksilbers und die Contraction der Arterie sich deckende Momente sind. Weil also von einer Abkürzung der Contraction gar nicht die Rede sein kann, vielmehr die Zusammenziehung der Arterie aus physikalischen Gründen nothwendig fortdauern muss, bis der nächste Puls eine neue Expansion der Arterie mit sich bringt, so ist eine Unterscheidung des häufigen und schnellen Pulses in dem eben angegebenen Sinne vollkommen unthunlich.

Man könnte versucht sein, die Sache umzukehren und den schnellen Puls nicht in der kurzen Dauer der Contraction, sondern in der Schnelligkeit der Expansion zu suchen. Die Expan-

sion der Schlagadern ist die Wirkung der Systole, und die Systole als Muskelcontraction könnte möglicher Weise bald rasch erfolgen, bald langsam. In der That ist gegen diese Möglichkeit nichts einzuwenden, nur zweifle ich, dass die Aerzte, die von einem schnellen Pulse sprechen, von seiner Wirklichkeit sich überzeugen konnten.

Man denke sich den Puls durch ein Kymographion als Curve verzeichnet, so müssten bei einem schnellen Pulse die Abscissenabschnitte der aufsteigenden Wellen klein sein. Natürlich sind sie dies bei jedem häufigen Pulse, aber eben weil sich in diesem Falle das Kleinwerden der bezüglichen Abscissensegmente von selbst versteht, ist die Unterscheidung eines schnellen und häufigen Pulses, wenn sonst kein Grund vorliegt, ganz überflüssig. Eine Unterscheidung wird dann erst gerechtfertigt, wenn sich das Abscissensegment der Systole verkürzen kann auf Kosten des Abscissensegmentes der Diastole. Dies kommt nun zwar wirklich vor, aber unstreitig nur in dem beschränkten Masse, dass es eben nur in einer gezeichneten Curve sinnlich wahrnehmbar wird. Eine Abschätzung der zeitlichen Differenz der Expansion und Contraction der Arterie durch das Getast halte ich für vollkommen unmöglich.

Einige Praktiker haben mir die Bemerkung entgegengestellt, dass man in manchen Fällen die Entwickelung der Pulswelle unter den Fingern deutlich und einigermassen anhaltend fühle, während in anderen Fällen die Hebung des Pulses im Momente wieder schwinde und wie ein Stoss ohne Zeit wirke. Dass nun pulsirende Arterien den Tastsinn in dieser Weise verschieden afficiren können, ist zuzugeben, nur hängen solche Empfindungen von den zufälligsten Umständen ab und sind eben darum zur Begründung wissenschaftlicher Unterscheidungen ganz ungeeignet. Man befühle an demselben Individuum eine Arterie, welche von Weichtheilen umgeben ist, und eine zweite, welche am Knochen anliegt oder gar durch das Messer frei gelegt wurde, so wird im ersten Falle der Puls nicht nur schwächer, sondern auch schnel-

ler, im zweiten nicht nur stärker, sondern auch langsamer scheinen. Ebenso wird es von dem Grade des Drucks, welchen der tastende Finger auf die Schlagader ausübt, abhängen, ob das Gefühl des Pulses ein momentanes oder einigermassen anhaltendes sei. Berührt der Finger die Arterie äusserst leise, so wird er gewissermassen nur vom obersten Gipfel der Welle getroffen; drückt er dagegen stärker, so wird ihm die ganze Entwickelung der Welle wahrnehmbar, was länger dauert.

Aber abgesehen davon, dass diese verschiedenen Gefühle unter dem Einflusse ganz zufälliger Umstände stehen, so beziehen sie sich vor allen Dingen gar nicht auf jene Vorgänge in den Schlagadern, welche zur Unterscheidung eines langsamen und schnellen Pulses theoretisch berechtigen würden. Was man beim Pulse fühlt, ist nämlich die Ortsveränderung der Arterie, nicht aber ihre Expansion und Contraction, am wenigsten die Zeitdauer jeder einzelnen, und doch ist es eben der Unterschied ihrer Zeitdauer, auf dessen Wahrnehmung Alles ankommen würde. Solche Unterschiede sind viel zu fein, als dass der Tastsinn sie wahrnehmen könnte. Wenn man einen Hämodynamometer in einer Arterie anbringt und die Oscillationen des Quecksilbers beobachtet, welche mit den Expansionen und Contractionen des Gefässes zusammenfallen, so ist man nicht im Stande, sich über die Schnelligkeit des Pulses ein Urtheil zu bilden. Man kann unterscheiden, ob das Quecksilber im Steigen oder im Sinken einen grösseren Raum zurücklege, aber man kann nicht unterscheiden, ob der Vorgang des Steigens oder des Sinkens ein Mehr von Zeit beanspruche. Gleichwohl ist das Auge das feinere Organ und percipirt die Zeitverhältnisse der Bewegung weit schärfer als der Tastsinn.

Die Unterscheidung eines häufigen und schnellen Pulses ist demnach theoretisch vollkommen gerechtfertigt, aber sie ist praktisch nur ausführbar, wenn man Instrumente zu Hülfe nimmt, deren Anwendung eine Vivisection erfordert. Was die Praktiker als schnellen und langsamen Puls bezeichnen, ist von Zufällig-

keiten abhängig und für die Heilkunde wahrscheinlich ebenso überflüssig, als für die Physiologie unbrauchbar.

§ 214. Der *pulsus dicrotus* oder Doppelpuls hat das Eigenthümliche, dass immer je zwei Schläge unmittelbar auf einander folgen, und dass dann eine kleine Pause eintritt, welche den Vorläufer zu einem neuen Doppelpulse bildet. Für den Theoretiker hat es Interesse zu fragen, was diesen ungewöhnlichen Vorgang veranlasse. Inwiefern nun der Puls zunächst vom Herzstosse abhängt, wäre vor Allem zu untersuchen, ob nicht auch hier der doppelte Schlag von einer doppelten Zusammenziehung der Herzkammern ausgehe; dies scheint nicht der Fall zu sein. Nach den Versicherungen eines wissenschaftlich gebildeten Arztes ergiebt die Auscultation bei Personen, welche an *pulsus dicrotus* leiden, nichts, was auf einen Doppelschlag hinwiese. Auch soll schon der Tastsinn lehren, dass man es nicht mit zwei Pulswellen zu thun habe, sondern man fühlt im Grunde nur eine Welle, die scheinbar zwei Mal ansetzt, um sich zu entwickeln. Hätten die Praktiker Veranlassung, das Gefühl, welches sie beim *pulsus dicrotus* empfinden, auf eine doppelte Pulsation zu beziehen, so müssten sie gleichzeitig eine verdoppelte Frequenz annehmen, von welcher meines Wissens nirgends die Rede ist. Hieraus ergiebt sich mit grosser Wahrscheinlichkeit, dass die Ursache des *pulsus dicrotus* in einer doppelten Zusammenziehung des Herzens nicht liege, ein Resultat, welches insofern kaum befremden kann, als ich, für die Fische wenigstens, direct erwiesen habe, dass sich ein einfacher Herzschlag mit einem doppelten Arterienpulse combiniren könne.

In dem Abschnitte über Wellenbewegung des Wassers in elastischen Röhren ist bereits nachgewiesen worden, wie Doppelwellen bei einfachen Stössen der treibenden Kraft entstehen können. Der Stoss wird in der Flüssigkeit mit der Geschwindigkeit der Schallwellen fortgepflanzt, in den Wandungen der elastischen Schläuche dagegen langsamer. In Folge dieses doppelten Systems von Wellen können Erscheinungen der Interfe-

renz eintreten, welche mit denen des *pulsus dicrotus* zusammenfallen. Sehr wahrscheinlich ist die Erklärung dieser eigenthümlichen Pulsart hiermit wirklich gegeben. Unter dieser Voraussetzung müsste Seltenheit der Herzstösse, Vorwalten der Diastole vor der Systole und Erschlaffung der Arterienhäute zu den Bedingungen gehören, welche das Auftreten des *pulsus dicrotus* begünstigten, und so ist es wirklich. Fast alle Pulscurven stammen von Thieren her, deren Puls sehr selten, oder deren Blutdruck sehr gering ist. Bei den Fischen, deren Diastole im Vergleiche zur Systole so überaus lange dauert, ist die Erscheinung des *pulsus dicrotus*, wie das Kymographion lehrt, nicht ungewöhnlich.

§ 215. Nach Angabe der Aerzte kommen Fälle vor, wo der Puls in einzelnen Theilen verschwindet, oder auch umgekehrt in Arterien auftritt, welche gewöhnlich nicht pulsiren. Anlangend das Verschwinden des Pulses, so dürften die Ursachen desselben in zwei Classen zerfallen. Es können nämlich ein Mal Fälle vorkommen, wo das Eintreten der vom Herzen ausgestossenen Blutmasse in gewissen Arterien erschwert oder ganz verhindert ist, und andererseits können die Gefässwandungen in Zustände gerathen, welche die Ortsbewegung in dem Grade beschränken, dass sie für den tastenden Finger unmerkbar wird. Ersteres bedarf keiner Erläuterung, Letzteres wird nicht nur bei Verknöcherungen der Arterien, sondern voraussichtlich auch dann eintreten, wenn die Gefässwandungen durch das Mittel der Contractilität eine Dichtigkeit annehmen, welche den Excursionen dieser elastischen Schläuche zu enge Grenzen steckt. Uebrigens wird der Puls um so unmerklicher, je kleiner die Wellen werden, und ich habe in einem früheren Abschnitte gezeigt, dass die Wellengrösse mit Zunahme der Widerstände constant abnimmt (§ 54). Unter diesen Umständen ist begreiflich, dass in weit ausgebreiteten heftigen Entzündungen der Puls der benachbarten Schlagadern verloren geht, wie häufig im Brande, denn die Stasis des Blutes in den Capillaren ist für alle zuführenden Gefässe ein absoluter Widerstand.

Anlangend das Pulsiren von Arterien, welche unter normalen Verhältnissen nicht fühlbar sind, so ist bekannt, dass namentlich Entzündungen zu dieser Erscheinung Gelegenheit geben. In einer früheren Periode der Physiologie war man geneigt, ein solches locales Pulsiren mit einer erhöhten Lebensthätigkeit der Arterien selbst in Verbindung zu setzen; gegenwärtig ist an eine derartige Erklärung nicht mehr zu denken, da die mechanische Abhängigkeit des Pulses vom Herzschlage unzweifelhaft ist. Wenn unter normalen Verhältnissen nur die grösseren, nicht aber die kleineren Arterien pulsiren, so ist einleuchtend, dass letztere, sobald sie gross werden, an den Vorgängen des Pulses Antheil nehmen müssen. Dies bewährt sich zunächst in den Collateralästen, welche nach Unterbindung eines Hauptstammes an Umfang zunehmen und nun, wie es grösseren Schlagadern zukommt, auch pulsiren. In dem eben erwähnten Falle geschieht die Umbildung kleiner Arterien in grosse nur langsam durch Vermittelung des Wachsthums, in anderen Fällen geschieht sie rasch durch Erschlaffung der Gefässwandungen, die nun dem Blutdrucke nachgeben und an Umfang zunehmen. Schon hiernach ist verständlich, weshalb das anormale Pulsiren von Schlagadern so oft im Gefolge örtlicher Hyperhämien auftritt.

Befremden könnte, dass in Anämien, welche durch häufig wiederholte Blutverluste verursacht sind, nach Angabe Marshal Halls ebenfalls ein Pulsiren an Orten auftritt, wo unter normalen Verhältnissen der Puls nicht merklich ist. Da nämlich in Folge des Blutverlustes die Arterien enger werden, so sollte man den umgekehrten Erfolg erwarten. In der Regel wird auch der Puls bei Anämien kleiner und für den Arzt, welcher ihn beobachtet, unmerklicher, nur der Kranke fühlt ihn lebhafter, weil sein Gemeingefühl in ungewöhnlichem Masse gesteigert ist. Indess lassen sich die von Marshal Hall beobachteten Fälle selbst dann erklären, wenn die Verstärkung des Pulses einen objectiven Grund hat. Wiederholte Blutverluste begünstigen nämlich in hohem Grade eine Ungleichheit in der Blutvertheilung, es treten trotz

der allgemeinen Blutarmuth örtliche Hyperhämien auf, welche eine locale Hebung des Pulses um so leichter veranlassen können, als der Zustand des Kranken eine gewisse Erschlaffung und folglich auch eine grosse Nachgiebigkeit der Gefässwandungen bei Einwirkung des Herzstosses nach sich zieht.

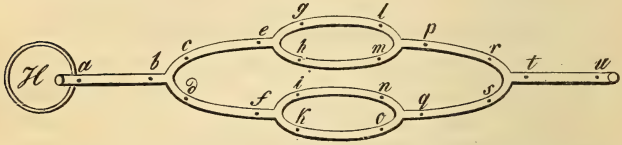
Cap. XV.

Mechanische Störungen im Gefässsystem und deren Folgen.

§ 216. Bei den vielen und innigen Beziehungen aller Organe unter einander hat jede locale Störung eines lebenden Körpers sehr ausgebreitete Folgen. So leicht es in vielen Fällen ist, sich hiervon durch unmittelbare Anschauung zu überzeugen, so schwer ist es meistens, den Gang der Begebenheiten in seiner ursächlichen Verbindung aufzufassen. Dies fühlen am meisten die Aerzte, welche nicht ohne Grund klagen, dass die Physiologie in Bezug auf gestörte Lebensprozesse und deren Zusammenhang weniger leiste, als im Interesse der Heilkunde zu wünschen wäre.

Die Störungen im Gefässsysteme geben zu solchen Klagen vorzugsweise Anlass, denn indem sie einerseits in das Nervenleben, andererseits und noch unmittelbarer in die Ernährungsverhältnisse eingreifen, entstehen sehr bald Verwickelungen, die auch der scharfsinnigste Forscher nicht mehr zu entwirren vermag. Ueberzeugt, dass die Aetiologie, welche zu viel unternimmt, am wenigsten auf Erfolge rechnen könne, werde ich meine Aufgabe zu beschränken suchen; ich werde von allen Nerven- und Nutritionsstörungen gänzlich absehen und ausschliesslich solche Veränderungen ins Auge fassen, welche einer physikalischen Behandlung Angriffspunkte bieten.

§ 217. Ich will zunächst die Folgen untersuchen, welche aus der Unterbindung von Gefässen hervorgehen, und da es mir nicht auf die spezifisch vitalen Wirkungen, sondern auf die nächsten physikalischen Folgen ankommt, so bedarf ich zur Untersuchung nicht einmal eines lebenden Körpers, sondern nur eines nach Art der Blutgefässe verzweigten Röhrensystems. Der Apparat, welcher in nachstehender Figur abgebildet ist, und welcher schon § 34 ausführlich beschrieben wurde, hat zur Anstellung der Versuche gedient.



An drei Punkten dieses verzweigten Röhrensystems waren Hähne angebracht, welche die bezüglichen Stromarme abzuschliessen erlaubten; der eine im zweiten Abschnitte des Apparates in der Mitte zwischen *d* und *f*, der zweite im dritten Abschnitte in der Mitte zwischen *g* und *l*, der dritte endlich im vierten Abschnitte in der Mitte zwischen *q* und *s*. Der Verschluss eines Hahnes ist einer Gefässligatur vergleichbar, und zwar kann, mit Bezug auf die Richtung des Stromes von *a* nach *u*, der Verschluss von *d f* als Arterienligatur, der Verschluss von *g l* als Capillarligatur und der Verschluss von *q s* als Venenligatur betrachtet werden. Die Wirkungen dieser Ligaturen wurden zunächst an den Druckmessern *a b c . . . u* beobachtet, indem das Steigen oder Sinken des Wassers in denselben die Veränderungen des Seitendrucks durch das ganze System zu erkennen gab. Ausserdem liess sich aber auch der Einfluss berechnen, welchen der Verschluss eines Hahnes auf die Veränderung der Stromschnelle hatte. Ich habe § 29 nachgewiesen, dass die zwischen zwei Druckmessern stattfindende Seitendruckdifferenz ein Widerstandswerth (*w*) ist, aus welchem nach der Formel

$$v = -\frac{b}{2a} + \sqrt{\frac{\left(\frac{b}{a}\right)^2}{4} + \frac{w}{a}}$$

die Geschwindigkeit der Bewegung berechnet werden kann. Es kommt nur darauf an, die Widerstandscoëfficienten a und b ermittelt zu haben, und da der Apparat, abgesehen von unwesentlichen Modificationen, derselbe ist, dessen wir uns oben bedienten, so gelten auch dieselben Coëfficienten $a = 0{,}000050056$ und $b = 0{,}025667$ (§ 35).

Natürlich lassen sich die Folgen der Ligaturen als Störungen nur dann mit Klarheit übersehen, wenn sie vergleichbar sind mit den normalen Vorgängen, welche bei überall offenen Röhren vorkommen. Ein Vergleich ist aber nur dann möglich, wenn, abgesehen von dem Schliessen der Hähne, alle übrigen Bedingungen des Experimentes sich vollkommen gleich bleiben. Ich habe also in allen Versuchen frisches Brunnenwasser und eine Fallhöhe von 691 Millim. angewendet. Die Werthe des Seitendrucks und der Stromschnelle, welche bei überall offenen Röhren erhalten wurden, konnten nun als Einheiten benutzt werden, auf welche sich die durch die Ligatur veränderten Werthe beziehen liessen. Ein besonderes Interesse hat die Frage, wie die örtliche Ligatur an verschiedenen Punkten des Systems verschieden wirke. In diesem Bezuge verfährt man am übersichtlichsten, wenn man die durch die Ligaturen veranlassten Veränderungen im Seitendrucke und in der Stromschnelle als aliquote Theile jener Werthe aufzeichnet, welche im Grundversuche bei überall offenen Röhren erhalten wurden. Gesetzt, wir hätten im Grundversuche einen Druck = 100 Millim. und nach erfolgter Verschliessung des Hahnes in einem Falle 107, in einem anderen 93 Millim., so würde jener als Druckvermehrung von + 0,07 und dieser als Druckverminderung von — 0,07 bezeichnet werden. Ich habe diese Darstellung der Störungsgrössen nicht nur bei den veränderten Drucken, sondern auch bei den verän-

derten Geschwindigkeiten vielfältig benutzt und erwähne dies hier im Allgemeinen, um unbequeme Wiederholungen vermeiden zu können.

§ 218. Ich werde jetzt die Ergebnisse des Grundversuches mittheilen, in welchem sämmtliche Röhren des Apparates offen gehalten wurden. Bei einer Fallhöhe von 691 Millim. betrug der Seitendruck

in den Druckmessern: *)		in den Druckmessern:	
a	547 Millim.	*l*	329 Millim.
b	438 »	*m*	329 »
c	392 »	*n*	328 »
d	394 »	*o*	329 »
e	358 »	*p*	291 »
f	359 »	*q*	291 »
g	344 »	*r*	263 »
h	343 »	*s*	264 »
i	342 »	*t*	138 »
k	344 »	*u*	34 »

§ 219. In einem anderen Versuche wurde der Hahn der Röhre *d f* geschlossen, welcher dem zweiten Abschnitte des Apparates angehört. Die nachfolgende Tabelle ist so eingerichtet, dass die erste Columne die beobachteten Druckwerthe, die zweite Columne die beobachtete Störung, d. h., wie § 217 erläutert wurde, die Veränderung des Drucks im Verhältniss zum Drucke des Grundversuches angiebt.

*) Zur bequemeren Uebersicht sind diejenigen Druckmesser durch Klammern zusammengezogen, welche sich in gleichen Entfernungen von der Einflussmündung des Apparates befinden.

Verschluss der Röhre *df*. Tab. IX. Fig. 3.

		I. Grösse des Seitendrucks	II. Grösse der Störung
Druckmesser	*a*	598,5 Mill.	+ 0,094
—	*b*	528 »	+ 0,205
—	*c*	440,5 »	+ 0,123
—	*d*	515 »	+ 0,307
—	*e*	376,5 »	+ 0,052
—	*f*	153,5 »	— 0,573
—	*g*	348 »	+ 0,011
—	*h*	347,5 »	+ 0,013
—	*i*	153,5 »	— 0,551
—	*k*	153,5 »	— 0,554
—	*l*	319,5 »	— 0,029
—	*m*	320,5 »	— 0,026
—	*n*	153 »	— 0,534
—	*o*	153,5 »	— 0,533
—	*p*	237,5 »	— 0,184
—	*q*	153 »	— 0,475
—	*r*	176,5 »	— 0,329
—	*s*	152,5 »	— 0,423
—	*t*	92 »	— 0,334
—	*u*	23 »	— 0,324

Zur bequemeren Uebersicht der Grösse der Störungen dient Tab. IX. Fig. 3, welche eine derartige Abbildung des verzweigten Röhrenapparates giebt, dass an den Punkten, wo sich die Druckmesser befinden, die Störungsgrössen unmittelbar notirt sind. Um die Zeichen + und — entbehrlich zu machen, sind die positiven Störungen, also die, welche auf einer Vermehrung des Drucks beruhen, über den Röhren und die negativen Störungen unter den Röhren angemerkt.*)

*) Dasselbe Prinzip gilt für alle Figuren auf Tab. IX und X, mit Aus-

§ 220. Die folgende Tabelle erläutert die Druckverhältnisse und die in denselben sich kundgebenden Störungen, wenn der Hahn bei *g l* im dritten Abschnitte verschlossen ist.

Verschluss der Röhre *g l*. Tab. IX. Fig. 4.

	I. Grösse des Seitendrucks	II. Grösse der Störung
Druckmesser *a*	551 Mill.	+ 0,007
— *b*	447 »	+ 0,020
— *c*	407,5 »	+ 0,039
— *d*	399 »	+ 0,012
— *e*	379 »	+ 0,059
— *f*	361 »	+ 0,006
— *g*	375 »	+ 0,090
— *h*	341 »	— 0,035
— *i*	344 »	+ 0,006
— *k*	345 »	+ 0,003
— *l*	300,5 »	— 0,056
— *m*	311,5 »	— 0,023
— *n*	328 »	— 0
— *o*	328 »	— 0,004
— *p*	276 »	— 0,052
— *q*	286,5 »	— 0,016
— *r*	250,5 »	— 0,048
— *s*	255 »	— 0,034
— *t*	136 »	— 0,015
— *u*	33,5 »	— 0,015

§ 221. Die folgende Tabelle bezieht sich auf den Fall, wo

nahme derjenigen, welche die Grundversuche erläutern. So giebt Tab. IX. Fig. 2 nicht Störungsgrössen, sondern die Druckwerthe an, welche im Grundversuche, bei überall offenen Röhren, beobachtet wurden. Die Stelle, wo der Apparat mittels des Hahnes verschlossen wurde, ist in den Figuren mit dem Zeichen ⊤ bemerkt.

die Röhre $q\ s$ im vierten Abschnitte geschlossen ist, und versinnlicht die physikalischen Folgen einer Venenligatur.

Verschluss der Röhre $q\ s$. Tab. IX. Fig 5.

	I. Grösse des Seitendrucks	II. Grösse der Störung
Druckmesser a	593 Mill.	+ 0,084
— b	524 »	+ 0,196
— c	437 »	+ 0,112
— d	504 »	+ 0,279
— e	373 »	+ 0,042
— f	501 »	+ 0,395
— g	342 »	— 0,006
— h	340 »	— 0,009
— i	501 »	+ 0,465
— k	501 »	+ 0,456
— l	317 »	— 0,037
— m	317 »	— 0,037
— n	501 »	+ 0,528
— o	501 »	+ 0,523
— p	235 »	— 0,193
— q	505 »	+ 0,735
— r	175 »	— 0,335
— s	150 »	— 0,432
— t	92 »	— 0,334
— u	28 »	— 0,176

§ 222. Vergleicht man diese drei Fälle unter einander, was durch Betrachtung von Tab. IX. Fig. 2, 3, 4 sehr erleichtert wird, so findet man, dass der Verschluss beliebiger Röhren in einem gefässartig verzweigten Systeme derselben gesetzlicher Weise nachstehende Folgen bedingt:

1) Die Totalsumme der Widerstände wächst. Dies ergiebt

sich daraus, dass die Störungsgrösse im Druckmesser *a*, also zunächst der Einflussmündung, in allen Fällen einen positiven Werth hat.

2) Der Seitendruck wächst in allen Röhren, welche dem Punkte, wo der Hahn angebracht ist, Wasser zuführen, und fällt umgekehrt in allen denen, welche das Wasser von eben diesem Punkte abführen.*)

3) In jeder Röhre, welche sich zu der verschlossenen als Collateralast verhält, kommt ein Punkt vor, wo der Druck constant bleibt, während er zu beiden Seiten desselben eine Veränderung erleidet, in den zuführenden Gefässen durch Zunahme, in den rückführenden durch Abnahme.

4) Die Druckveränderung oder Störungsgrösse nimmt in sämmtlichen Gefässen gegen die Ligatur hin zu, d. h. *a)* in den zuführenden Gefässen tritt von der Einflussmündung gegen die Ligatur hin eine Druckvermehrung oder Steigerung der normalen Druckwerthe ein; *b)* in den rückführenden Gefässen macht sich von der Ausflussmündung des Apparates gegen die Ligatur hin eine zunehmende Druckverminderung geltend; *c)* im Systeme der Collateralen erfährt der normale Druck, von der Linie der Druckconstanten an gerechnet, stromaufwärts eine progressive Vermehrung und stromabwärts eine progressive Verminderung bis zu den Punkten, wo das Collateralsystem einerseits mit den zuführenden, andererseits mit den rückführenden Gefässen anastomotisch zusammenhängt.**) Dass von diesen beiden Punkten aus die Störungsgrösse gegen die Ligatur hin wachse, und zwar in den zuführenden Gefässen in positivem, in den rückführenden

*) Theils um kürzere Ausdrücke zu gewinnen, theils um die Beziehung der hier angestellten Versuche zur Physiologie besser hervorzuheben, werde ich die erste Art von Röhren zuführende Gefässe, die letztere Art rückführende Gefässe nennen. Aus gleichem Grunde könnten wir statt Verschliessung des Hahnes sagen: Ligatur.

**) Linie der Druckconstanten nenne ich diejenige durch das Collateralsystem gezogene Linie, in welcher die Punkte liegen, wo irgend welche Veränderung des Drucks nicht eintritt.

Gefässen in negativem Sinne (also in derselben Richtung, in welcher die Störung im Collateralsysteme selbst fortschritt), ist unter *a* und *b* schon angegeben.

5) Je näher die Ligatur der Einflussmündung des Apparates liegt, um so unbedeutender sind die positiven Störungsgrössen stromaufwärts, und um so bedeutender die negativen Störungsgrössen stromabwärts von der Stelle des Verschlusses. Je näher dagegen die Ligatur der Ausflussmündung liegt, um so ansehnlicher wird die Druckvermehrung nach oben, und um so geringfügiger die Druckverminderung nach unten. *)

6) Die Grösse der Störungen im Allgemeinen wächst mit der Wichtigkeit des verschlossenen Stromarmes, d. h. sie ist um so beträchtlicher, je grösser die Massen von Flüssigkeit sind, welche durch den verschlossenen Arm abfliessen sollten. — Man vergleiche Fig. 3 und 5 mit Fig. 4.

7) Die Grösse der Störung ist in den Collateralgefässen erster Ordnung beträchtlicher als in denen zweiter Ordnung, und also wahrscheinlich in den Collateralen jedweder niedrigeren Ordnung ansehnlicher als in denen jedweder höheren. — Zum Verständniss der Terminologie bemerke ich, dass *h m* eine Collaterale erster Ordnung, dagegen die Röhren *i n* und *k o* Collateralen zweiter Ordnung für die Röhre *g l* abgeben. Der Beweis für den aufgestellten Lehrsatz ist in dem durch Fig. 4 erläuterten Fall zu suchen.

8) Alle zuführenden Gefässe, in welchen die Strömung durch die Ligatur verhindert wird, stehen unter gleichem Drucke, und zwar approximativ unter dem Seitendrucke der nächstliegenden Strömung nach oben hin. Als auffallendes Beispiel berücksichtige man den § 221 erörterten Fall, wo die Röhre *q s*, als Analogon einer Vene, verschlossen ist. In allen Druckmessern oberhalb des geschlossenen Hahnes findet sich ein ungefähr gleicher Druck von 501 Mill., und dieser Druck ist so gross, als er in der

*) Natürlich *caeteris paribus*, da die Störungsgrösse noch von anderen Umständen abhängt, wie der nächstfolgende Satz lehrt.

Mitte zwischen *b* und *c*, also an der Stelle der nächstliegenden Strömung nach oben ist.*)

9) Alle rückführenden Gefässe, in welchen die Strömung unterbrochen ist, stehen ebenfalls unter gleichem Drucke, nämlich unter dem Seitendrucke der nächstgelegenen Strömung nach unten hin. Das auffallendste Beispiel bietet dies Mal der § 219 erläuterte Fall, wo die einer Arterie vergleichbare Röhre *d f* verschlossen ist. In allen Druckmessern unterhalb des verschlossenen Hahnes finden wir einen Druck von ungefähr 153 Mill., und dieser Druck entspricht dem Seitendrucke des Stromes zwischen *r* und *t*, als dem nächstgelegenen nach unten.**)

Nicht unbemerkt bleibe, dass die Folgen, welche entstehen, wenn man den Hahn nur halb schliesst (also die Röhre verengert), von denen, welche durch vollständige Verschliessung hervorgerufen werden, nur quantitativ verschieden sind. Alle Störungen fallen geringer aus, wie sich von selbst versteht.

§ 223. Ich werde nun zur Untersuchung der Frage übergehen, welchen Einfluss die Verstopfung einer Röhre meines Apparates auf die Geschwindigkeit der Strömung ausübe, und zwar nicht blos auf die Stromschnelle im Allgemeinen, wovon oben bereits die Rede gewesen (§ 42), sondern auf die Geschwindigkeit eines jeden besonderen Stromarmes. Zunächst bedarf es wieder eines Grundversuches, welcher lehrt, wie schnell das Wasser bei überall offenen Hähnen durch jede der verschiedenen Röhren fliesst. Einen solchen Versuch besitzen wir aber in dem

*) Dass der Seitendruck an diesem Punkte, d. h. in der Mitte zwischen *b* und *c*, 501 Mill. betrage, ergiebt sich aus Folgendem. Die Druckdifferenz zwischen *a* und *b* beträgt auf 300 Mill. Distanz 593 — 524 = 69 Mill., also für 100 Mill. Distanz 23 Mill. Der in der Mitte zwischen *b* und *c* gelegene Punkt liegt aber 100 Mill. unter *b* und muss demnach einen Druck haben = 524 — 23 = 501 Mill., also dies Mal genau den Druck, welchen wir in den ausser Cours gesetzten Röhren beobachteten.

**) In der Röhre *p r* haben wir auf eine Distanz von 100 Mill. eine Seitendruckdifferenz von 20 Mill. Daher hat ein Punkt, welcher in der Mitte zwischen *r* und *t* oder 100 Mill. unterhalb *r* liegt, einen Druck = 176 — 20 = 156 Mill., was den beobachteten 153 sehr nahe steht.

§ 218 mitgetheilten; denn es lassen sich die Geschwindigkeiten, die wir suchen, aus den Unterschieden des Drucks berechnen, welche zwischen den beiden Manometern jeder Röhre unseres Apparates zum Vorschein kommen. Uebrigens war in diesen, wie in allen übrigen Beobachtungen, die im Zeitraume von zwei Minuten abfliessende Wassermenge bestimmt worden, so dass sich, bei der bekannten Durchschnittsfläche der Röhren meines Apparates, die Stromschnelle aus der Beobachtung unmittelbar ergab. *)

In der folgenden Tabelle sind die mit Hülfe der Widerstands-coëfficienten berechneten Geschwindigkeiten und die durch den Wasserabfluss unmittelbar gegebenen in zwei Columnen neben einander gestellt. Aus der Vergleichung beider Werthe ergeben sich Unterschiede, welche approximativ als Fehlergrössen der ersten Columne betrachtet werden können. Indess ist doch zu berücksichtigen, dass die Unterschiede in den Werthen von v nicht allein der Rechnungsmethode zur Last fallen. Genau gemessen war nur die Röhre *a b* meines Apparates, für die übrigen wurde eine gleiche Weite vorausgesetzt, weil sie als gleichweit vom Mechanicus geliefert wurden. Aber schon Zirkelmessungen zeigten, dass eine absolute Gleichheit der Weiten nicht stattfand.

Alle Röhren offen. Tab. IX. Fig. 6.

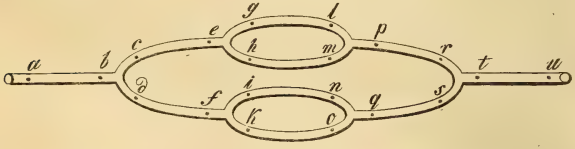
Bezeichnung der Röhre	Grösse der Druckdifferenz	Stromschnelle		Fehlergrösse
		v berechnet	v beobachtet	
a b	109 Mill.	1241,3 Mill.	1219,2	$+\frac{1}{55}$
c e	34 »	606,8 »	609,6	$-\frac{1}{218}$
d f	35 »	628,7 »	609,6	$+\frac{1}{31}$
g l	15 »	348,1 »	304,8	$+\frac{1}{7}$
h m	14 »	331,3 »	304,8	$+\frac{1}{11}$
i n	14 »	331,3 »	304,8	$+\frac{1}{11}$
k o	15 »	348,1 »	304,8	$+\frac{1}{7}$
p r	28 »	534,3 »	609,6	$-\frac{1}{8}$
q s	27 »	521,6 »	609,6	$-\frac{1}{7}$
t u	104 »	1220,7 »	1219,2	$-\frac{1}{106}$

*) Man vergleiche hierüber S. 58.

§ 224. Der Zweck der eben mitgetheilten Beobachtungen war der, die normalen Werthe für v zu finden, um an ihnen die Grösse der Störungen zu messen, welche eintreten, wenn der eine oder andere Stromarm abgeschlossen und hiermit die Geschwindigkeit der Strömung verändert wird. Ich beabsichtige nämlich in ganz ähnlicher Weise, wie dies oben bei Untersuchung des Seitendrucks gehalten wurde, die Störung der Stromschnelle in aliquoten Theilen der normalen Geschwindigkeit auszudrücken.

Es könnte nun scheinen, dass als normale Werthe die in der vierten Columne meiner Tabelle verzeichneten und unmittelbar beobachteten Geschwindigkeiten benutzt werden müssten, da sie unfehlbar genauer als die berechneten sind; demungeachtet habe ich mich überzeugt, dass dies nicht der Fall sei. Dies bedarf einer Aufklärung.

Unter den Fällen der Störung kommen solche vor, wo eine unmittelbare Beobachtung der Werthe v nicht möglich und folglich eine Berechnung derselben aus den Seitendruckdifferenzen unvermeidlich ist.



Setzen wir beispielsweise den Fall, es werde die Röhre $g\ l$ durch Verschluss des Hahnes abgesperrt, so kann aus der Wassermenge, welche in einer gegebenen Zeit abfliesst, zwar die Stromschnelle in $a\ b$ und $t\ u$, nicht aber in irgend einer anderen Röhre ermittelt werden. Denn wenn vor dem Verschlusse des Hahnes angenommen werden durfte, die Geschwindigkeit in $c\ e$, $d\ f$, $p\ r$ und $q\ s$ sei $\frac{1}{2}$ so gross, und die in $g\ l$, $h\ m$, $i\ n$ und $k\ o$ $\frac{1}{4}$ so gross als die aus Beobachtung bekannte in $a\ b$, so hört nach Verschluss des Hahnes die Möglichkeit einer solchen Folge-

rung offenbar auf. Indem es also unter Umständen unvermeidlich ist, die gestörte Geschwindigkeit durch Rechnung zu finden, so ist es für die Ermittelung der Störungsgrössen vortheilhafter, in allen Fällen zu rechnen, damit nicht Zahlenwerthe verglichen werden, die nach einem verschiedenen Prinzipe aufgefunden und theilweise eben dieses verschiedenen Prinzips wegen different sind. Die berechneten Werthe der Geschwindigkeit fallen in einigen Röhren deshalb so ungünstig aus, weil die in ihnen stattfindenden Stauungsverhältnisse den Werth des Seitendrucks (w der Formel) wesentlich ändern.*) Natürlich entstehen nun auffallende Irrungen, wenn man die Störungsgrösse, welche nichts Anderes als das Verhältniss der veränderten Geschwindigkeit zur normalen sein soll, in der Weise berechnet, dass man bei jener den Einfluss der Stauung in Betracht nimmt, bei dieser dagegen unberücksichtigt lässt.

Aus dem Gesagten ergiebt sich für die Kritik der nachstehenden Beobachtungen so viel, dass man den Vorwurf der Ungenauigkeit, welcher die von mir berechneten Geschwindigkeiten theilweise trifft, nicht auf die ebenfalls berechneten Geschwindigkeitsstörungen übertragen darf. Denn da letztere Verhältnisse von Zahlen sind, die unter dem Einflusse eines und desselben Fehlers stehen, so werden sie von diesem nur wenig berührt und können der Wahrheit sehr nahe kommen.

§ 225. Um nun den Einfluss der Ligaturen auf die Stromschnelle zu prüfen, wurde zunächst der zwischen $d\,f$ befindliche Hahn verschlossen. Der Erfolg ergiebt sich aus der Tabelle.

---

*) Man vergl. die Druckdifferenzen der Röhren $c\,e$ und $d\,f$ mit denen in $p\,r$ und $q\,s$, welche nur in Folge der Stauung so verschieden ausfallen.

Verschluss der Röhre *d f*. Tab. IX. Fig. 7.

Bezeichnung der Röhre	Grösse der Druckdifferenz	berechnete Stromschnelle	Grösse der Störung
a b	70,5 Mill.	957,9 Mill.	— 0,228
c e	64 »	889,9 »	+ 0,466
a f	0 »	0 »	
g l	28,5 »	540,6 »	+ 0,553
h m	27 »	521,6 »	+ 0,574
i n		0 »	
k o		0 »	
p r	61 »	877 »	+ 0,641
q s		0 »	
t u	69 »	945,4 »	— 0,217

Um zu ermitteln, inwieweit die berechnete Stromschnelle mit der wirklichen übereinstimmte, wurde die Geschwindigkeit der Strömung an dem Abflusse des Wassers gemessen. Der Apparat entleerte in zwei Minuten 4186 Gramm. Wasser. Da nun der Durchmesser der Röhre 6,85 Mill. betrug, so ergiebt sich die Geschwindigkeit für 1 Secunde = 946,6. Demgemäss hätte die Stromschnelle in den Röhren *a b, c e, p r, t u* 946,6 und in den Röhren *g l, h m* $\frac{1}{2}$ 946,6 = 473,3 Mill. betragen sollen, woraus sich die kleinen Fehlergrössen leicht berechnen lassen. Man bemerke beiläufig, dass die Geschwindigkeit in der Röhre *p r* wie im Grundversuche (§ 223) um ein Ansehnliches zu klein ist, ein Beweis, dass dieser Fehler an der Beschaffenheit der Röhre haftet, was im vorigen § auch berücksichtigt wurde.

§ 226. Verschliesst man die Röhre *g l* im dritten Abschnitte, so ergiebt sich Folgendes.

Röhre *g l* verschlossen. Tab. IX. Fig. 8.

Bezeichnung der Röhre	Grösse der Druckdifferenz	berechnete Stromschnelle	Grösse der Störung
a b	104 Mill.	1207,7 Mill.	— 0,027
c e	28,5 »	540,6 »	— 0,109
d f	38 »	651,9 »	+ 0,037
g l	0 »	0 »	
h m	29,5 »	553 »	+ 0,669
i n	16 »	364,4 »	+ 0,099
k o	17 »	380,3 »	+ 0,092
p r	25,5 »	502 »	— 0,069
q s	31,5 »	577 »	+ 0,106
t u	103,5 »	1189,3 »	— 0,015

Die Geschwindigkeit der Strömung in den Röhren *a b* und *t u* betrug dem Wasserabfluss zu Folge 1174,7 Mill., was mit der Rechnung sehr gut übereinstimmt. Die für die übrigen Röhren berechneten Werthe der Stromschnelle lassen sich durch den Ausfluss im vorliegenden Falle nicht controliren. Indess giebt es doch ein Mittel, die Verlässigkeit der Rechnung im Allgemeinen zu überschlagen. Die beiden Röhren *c e* und *d f* müssen die Wassermasse entleeren, welche sie von *a b* erhalten, und folglich muss die Summe ihrer Geschwindigkeiten gleich sein der Geschwindigkeit in *a b*. Nun ist 540,6 + 651,9 = 1192,5 die berechnete Grösse für 1174,7 der Beobachtung. Da die Summe sehr genau zutrifft, so lässt sich vermuthen, dass auch die Summanden der Wahrheit nahe kommen. Nach demselben Prinzipe müssen die Geschwindigkeiten der drei offenen Röhren des dritten Abschnittes zusammengerechnet gleich sein der Geschwindigkeit im ersten Abschnitte. Wir haben 553 + 364,4 + 380,3 = 1297,7 Mill., statt 1174,7 der Beobachtung, also etwas zu viel, und endlich im dritten Abschnitte 502 + 577 = 1079, also etwas zu wenig. Letzteres bestätigt nochmals, dass die im

vierten Abschnitte vorkommenden Rechnungsfehler weder dem Rechner noch Beobachter zur Last fallen, sondern vom Apparate ausgehen und in den Verhältnissen der Stauung begründet sind.

§ 227. Zuletzt wurde der Hahn verschlossen, welcher in der Röhre *q s* angebracht ist.

Verschluss der Röhre *q s*. Tab. X. Fig. 2.

Bezeichnung der Röhre	Grösse der Druckdifferenz	berechnete Stromschnelle	Grösse der Störung
a b	69 Mill.	945,4 Mill.	— 0,238
c e	64 »	889,9 »	+ 0,466
d f	0 »		
g l	25 »	501,4 »	+ 0,440
h m	23 »	471,1 »	+ 0,422
i n	0 »		
k o	0 »		
p r	60 »	868 »	+ 0,625
q s	0 »		
t u	64 »	889,9 »	— 0,263

Nach der Quantität des Wasserabflusses war v in *a b*, *c e*, *p r* und *t u* = 952, was zu dreien der berechneten Werthe ganz leidlich passt. Wiederum war die Röhre *p r* im vierten Abschnitte diejenige, wo der berechnete Werth v am meisten hinter dem wahren zurückblieb. In den Röhren *g l* und *h m* hätte dem Ausflusse zu Folge $v = \frac{952}{2} = 476$ sein sollen. Unsere berechneten Werthe kommen diesen ziemlich nahe.

Auch hier gilt, was bei Untersuchung des Seitendrucks oben bemerkt wurde, dass ein halber Verschluss des Hahnes oder eine Verengerung der Röhre dieselben Folgen, nur mit veränderter Intensität hervorruft, als vollständige Verschliessung.

§ 228. Der Einfluss, welchen der Verschluss des einen oder anderen Collateralastes auf die Geschwindigkeit der Strömung ausübt, ist kein zufälliger, sondern ein gesetzlicher. Wir kön-

nen aus den Beobachtungen, welche im Vorhergehenden mitgetheilt wurden, folgende Lehrsätze ableiten:

1) Durch Verschluss eines Stromarmes in einem verzweigten Röhrensysteme wird die Geschwindigkeit der Strömung in den zuführenden und rückführenden Gefässen vermindert.

2) Durch Anbringung von Ligaturen wird die Stromschnelle in den Collateralgefässen gesteigert, und zwar in denen erster Ordnung mehr als in denen zweiter, also wahrscheinlich in denen jeder niedrigeren Ordnung mehr als in denen jeder höheren.

3) Durch Anbringung von Ligaturen wird (wie schon aus 1 ersichtlich) die Strömung im Ganzen beeinträchtigt, also die Dauer der Circulation verlängert.

§ 229. Die Erfahrungen, welche wir im Vorhergehenden gemacht haben, sind nicht nur für den Apparat bindend, mit welchem wir operirten, sondern auch für das Gefässsystem im lebenden Thiere. Wir sind bereits auf verschiedene Erscheinungen gestossen, welche nur aus den eben entwickelten Gesetzen verständlich sind. So sehen wir, dass der Hämodynamometer in dem centralen Ende einer durchschnittenen Arterie weit höhere Druckwerthe ergiebt als in dem peripherischen. Dies beruht auf dem Gesetze, dass nach Abschluss eines Stromarmes der Druck oberhalb der Ligatur steigt und unterhalb sinkt, und zwar oberhalb steigt bis zum Werthe des Seitendrucks der nächstliegenden Strömung nach oben, und unterhalb sinkt bis auf die Grösse des Seitendrucks im nächstliegenden Strom nach unten. Magendie fand, dass ein in die linke Carotis eingeführter Druckmesser stieg, wenn die entsprechende Schlagader der rechten Seite unterbunden wurde, ein Verhältniss, welches auf dem Gesetze beruht, dass jede Ligatur den Seitendruck in den Collateralen steigert, und Poisseuille beobachtete, dass der Druck in einer Schenkelvene auf die Höhe des Blutdrucks in der Schenkelarterie sich steigerte, wenn alle übrigen rückführenden Gefässe unterbunden wurden.

Indem nun die nächsten physikalischen Folgen der Gefässun-

terbindungen ermittelt sind, wird es leichter, die Vorgänge zu übersehen, welche sich aus ihnen, als ihren natürlichen Bedingungen, entwickeln müssen. So kann bei der Nachgiebigkeit der Gefässwandungen des Thierkörpers kein Zweifel sein, dass Vermehrung des Seitendrucks eine Expansion des bezüglichen Gefässes, dagegen Verminderung desselben eine Contraction zur Folge habe. Wiederum ist Expansion der Gefässe unzertrennlich verbunden mit Verdünnung ihrer Wandungen, und indem Vermehrung des Drucks von innen und Verdünnung der Wandung zusammenfallen, entstehen Bedingungen, welche die Exosmose begünstigen. Haben wir also im Vorhergehenden die Gesetzlichkeit kennen lernen, nach welcher sich bei Application von Ligaturen die Druckverhältnisse ändern, so haben wir gleichzeitig einige Einsicht in die dann eintretenden Veränderungen der exosmotischen und endosmotischen Verhältnisse gewonnen, welche im Ernährungsprozesse so wichtig werden. Ich werde im Nachstehenden auf einige physiologische und pathologische Vorgänge aufmerksam machen, welche dem Verständniss etwas näher getreten sein dürften.

Durch äusseren Druck auf Venen, nicht aber auf Arterien, entstehen pathologische Auftreibungen, die bekannten *varices*. Der Grund hiervon liegt strenggenommen nicht in der relativen Dickwandigkeit der Schlagadern, denn ungefähr in demselben Masse, als ihre Wandungen stärker sind, ist auch der in ihnen wirksame Blutdruck mächtiger, sondern darin, dass die Arterien der Einflussmündung des Gefässsystems näher liegen. In Folge hiervon müssen die positiven Störungsgrössen von der Ligatur aus stromaufwärts in den Arterien viel geringer sein als in den Venen (§ 222. Nr. 5).

Durch den Einfluss der Kälte werden die Blutgefässe der äusseren Körpertheile verengt, und Verengerung wirkt wie Ligatur, nur in vermindertem Massstabe. Hieraus ergiebt sich, dass durch den Einfluss der Kälte auf die Gefässe der Haut die Collateralen dieser, also die mehr innerlich gelegenen Adern, Störungen

erfahren, welche sich als Steigerung des Blutdrucks und Vermehrung der Stromschnelle geltend machen müssen. Die Vermehrung des Blutdrucks ist mit Ausdehnung der Gefässe und mit Steigerung der Exosmose verbunden, wodurch theilweise das häufige Harnen bei erkaltender Haut erklärt wird, vielleicht auch das bisweilen so plötzliche Eintreten von Diarrhoe nach starker Erkältung des Unterleibes. Natürlich muss nun Ausdehnung der Hautgefässe die entgegengesetzte Wirkung äussern, sie muss den Blutdruck und die Stromschnelle der entsprechenden Collateralen vermindern und demnach statt der exosmotischen die endosmotischen Prozesse befördern. Die medicinischen Wirkungen der warmen Umschläge, Frictionen und rothmachenden Mittel scheinen sich mit diesen Folgerungen recht wohl in Einklang bringen zu lassen. Wäre die Bemerkung begründet, dass zu warme Kopfbedeckungen einen verdummenden Einfluss ausüben, so läge die Vermuthung nahe, dass die Beschleunigung des Kreislaufs in den erweiterten Gefässzweigen der äusseren Theile eine nachtheilige Verminderung der Stromschnelle in ihren Collateralen, also im Gehirne, zur Folge hätte.

Die mit den Arterienunterbindungen entstehenden Gefahren sind offenbar nicht blos nach der Anämie abzumessen, welche in allen von der Schlagader versorgten Theilen hervorgebracht wird, sondern ebensowohl nach der Hyperhämie, welche nun in den Collateralen auftritt. Das Bedenkliche der Ligaturen in grossen und blutreichen Geschwülsten in der Nähe des Kopfes dürfte wesentlich damit zusammenhängen, dass die Hemmung der Blutbewegung in Theilen, die dem Gehirne so nahe liegen, einen gefährlichen Blutdruck in diesem zur Folge hat. Bei Unterbindung grosser Gefässe, d. h. solcher, welche einen grossen Theil der Blutmasse durchlassen, würde noch in Betracht kommen, dass eine solche die Geschwindigkeit der Circulation im Ganzen herabdrückt. Die Frage, ob eine Ligatur zu wagen sei oder nicht, würde unter Anderem auch von der Vorfrage abhängen, in welchem Verhältniss das zu unterbindende Gefäss zu seinen Colla-

teralen stände. Je grösser dieses Verhältniss ausfällt, um so grösser sind die Störungen, welche die Ligatur mit sich bringt. Das Verhältniss der Collateralen zu einander ist aber in verschiedenen Thieren so verschieden, dass schon aus diesem Grunde die Erfolge der Ligaturen sehr verschieden ausfallen müssen. Die Unterbindung der *aorta abdominalis*, welche beim Menschen lebensgefährlich ist, gelingt bei Katzen häufig, und würde beim Igel, nach den anatomischen Anordnungen zu urtheilen, nur wenig zu bedeuten haben. Ich bemerke dies, um anzudeuten, dass Versuche an Thieren über die Zulässigkeit oder Unzulässigkeit gewisser Ligaturen an Menschen keinen brauchbaren Massstab der Beurtheilung geben.

§ 230. Nach Analogie der im vorhergehenden Versuche über die Folgen der Ligaturen habe ich an meinem verzweigten Röhrensysteme Versuche über die Folgen der Blutentziehungen angestellt. Ich habe nämlich bald die eine, bald die andere Röhre genau in der Mitte zwischen zwei Druckmessern angebohrt und angemerkt, wie während des Fliessens die Drucke und die Geschwindigkeiten im Verlaufe des gesammten Systems sich ändern. Es entgeht mir nicht, dass diese Betrachtung von untergeordneter Bedeutung ist, insofern sie nur die physikalischen Folgen der Blutentziehung während der Zeit des Aderlasses selbst kennen lehrt; indessen glaubte ich, dass auch die nähere Erkenntniss dieser Verhältnisse keine ganz gleichgültige sei. Unstreitig sind die Zustände, welche dem Aderlass folgen, und die, welche während der Dauer des Blutflusses stattfinden, nicht ohne einigen Zusammenhang. Ich habe im Voraus nur zu bemerken, dass auch diese Experimente bei einer Fallhöhe von 691 Mill. angestellt wurden, und dass demnach die Störungsgrössen in derselben Weise wie früher auf die beiden Grundversuche bezogen werden konnten, welche bezüglich der Druckverhältnisse § 223 und bezüglich der Stromschnelle § 218 erörtert wurden.

§ 231. Im ersten Versuche war die dem zweiten Abschnitte zugehörige Röhre *c e* angebohrt, so dass ein Fall beleuchtet wird,

welcher einer Arteriotomie vergleichbar ist. Ich werde, um Längen im Ausdrucke zu vermeiden, dieses Anbohren der Röhre immer Aderlass nennen. Der Wasserabfluss durch das Bohrloch betrug in 2 Minuten 1560 Gramm.

Aderlass bei *c e*. Tab. X. Fig. 3.

	I. Grösse des Seitendrucks	II. Grösse der Störung
Druckmesser *a*	498 Mill.	— 0,090
— *b*	363 »	— 0,171
— *c*	293,5 »	— 0,252
— *d*	344 »	— 0,178
— *e*	271 »	— 0,243
— *f*	291,5 »	— 0,188
— *g*	257,5 »	— 0,251
— *h*	257,5 »	— 0,249
— *i*	277 »	— 0,191
— *k*	276,5 »	— 0,196
— *l*	246,5 »	— 0,254
— *m*	248 »	— 0,246
— *n*	263,5 »	— 0,197
— *o*	262 »	— 0,207
— *p*	223,5 »	— 0,233
— *q*	228,75 »	— 0,215
— *r*	201 »	— 0,236
— *s*	202 »	— 0,235
— *t*	106 »	— 0,232
— *u*	26,5 »	— 0,221

§ 232. Im folgenden Falle ist der Aderlass in der Röhre *k o* veranstaltet, also in dem Abschnitte, in welchem das Wasser am langsamsten fliesst. Der Wasserabfluss durch das Bohrloch betrug in 2 Minuten 716 Gramm.

Aderlass bei *k o*. Tab. X. Fig. 4.

		I. Grösse des Seitendrucks	II. Grösse der Störung
Druckmesser	*a*	525 Mill.	— 0,041
—	*b*	409 »	— 0,066
—	*c*	360 »	— 0,082
—	*d*	360 »	— 0,087
—	*e*	328 »	— 0,084
—	*f*	319 »	— 0,112
—	*g*	311 »	— 0,096
—	*h*	312 »	— 0,091
—	*i*	302 »	— 0,117
—	*k*	298 »	— 0,134
—	*l*	296 »	— 0,101
—	*m*	298 »	— 0,094
—	*n*	288 »	— 0,122
—	*o*	286 »	— 0,131
—	*p*	261,5 »	— 0,101
—	*q*	257 »	— 0,117
—	*r*	237,5 »	— 0,097
—	*s*	232 »	— 0,121
—	*t*	123 »	— 0,109
—	*u*	31 »	— 0,088

§ 233. Die nachstehende Tabelle bezieht sich auf einen Versuch, wo die Röhre *p r*, als Analogon einer Vene, geöffnet wurde. Der Wasserabfluss durch das Bohrloch betrug in 2 Minuten 1080 Gramm.

Aderlass in der Röhre *p r*. Tab. X. Fig. 5.

		I. Grösse des Seitendrucks	II. Grösse der Störung
Druckmesser	*a*	515,5 Mill.	— 0,058
—	*b*	393 »	— 0,103
—	*c*	336,5 »	— 0,142
—	*d*	346,5 »	— 0,121
—	*e*	298 »	— 0,168

		I. Grösse des Seitendrucks	II. Grösse der Störung
Druckmesser	*f*	306 »	— 0,148
—	*g*	278 »	— 0,192
—	*h*	278,5 »	— 0,188
—	*i*	291 »	— 0,149
—	*k*	291 »	— 0,154
—	*l*	262 »	— 0,204
—	*m*	263 »	— 0,201
—	*n*	276 »	— 0,159
—	*o*	275,5 »	— 0,163
—	*p*	219 »	— 0,248
—	*q*	236 »	— 0,189
—	*r*	202,5 »	— 0,231
—	*s*	205,5 »	— 0,222
—	*t*	108 »	— 0,214
—	*u*	27 »	— 0,206

§ 234. Es gelten also für die Dauer des Aderlasses folgende Verhältnisse:

1) Der Seitendruck hat durch das ganze verzweigte Röhrensystem eine Verminderung erfahren.

2) Die allgemeine Verminderung des Seitendrucks ist um so auffälliger, je mehr Wasser durch die der Gefässwunde analoge Oeffnung abfliesst.

3) Die Störungsgrösse (welche nach Vorigem stets negativ ist) nimmt in den zuführenden Gefässen bis zur Stelle der Oeffnung zu, in den rückführenden Gefässen, von der Stelle der Oeffnung an, ab.

4) Die Störungsgrösse ist in den Collateralgefässen erster Ordnung grösser als in den Collateralgefässen zweiter Ordnung u. s. w.

5) Eine gesetzliche Progression der Störungsgrösse im Verlaufe der Collateralgefässe ist nicht bemerklich.

Aus dem unter 2) angegebenen Lehrsatze lässt sich mit Bezug auf anderweitige Erfahrungen ein neuer ableiten. Wenn man

eine horizontale Röhre, durch welche Wasser strömt, an verschiedenen Stellen anbohrt, so spritzt letzteres um so weiter und fliesst also um so rascher ab, je näher das Bohrloch der Einflussmündung liegt. Hieraus ergiebt sich, dass bei gleicher Grösse der Bohröffnungen die Verminderung des Seitendrucks um so beträchtlicher sein werde, je näher diese der Einflussmündung liegen, denn natürlich ist die Quantität des Abflusses bei gleicher Grösse der Oeffnungen proportional der Geschwindigkeit desselben.

§ 235. Ich gehe nun zur Untersuchung der Frage über, wie sich während der Zeit des Aderlasses die Stromschnelle verändere.

Aderlass in der Röhre *c e*. Tab. X. Fig. 6.

Bezeichnung der Röhre	Grösse der Seitendruckdifferenz	berechnete Stromschnelle	Grösse der Störung
a b	135 Mill.	1405,8 Mill.	+ 0,132
c e			
d f	32,5 »	589,2 »	— 0,062
g l	11 »	278,4 »	— 0,201
h m	9,5 »	249,1 »	— 0,248
i n	13,5 »	322,8 »	— 0,026
k o	14,5 »	345,8 »	— 0,006
p r	22,5 »	461,5 »	— 0,163
q s	26,75 »	518,3 »	— 0,006
t u	79,5 »	1029,7 »	— 0,147

Ich werde auch in diesen Versuchen nachweisen, inwieweit die berechneten Geschwindigkeiten als richtig betrachtet werden dürfen. Aus der Ausflussmündung des Apparates flossen in zwei Minuten 4700 Gramm. Wasser ab. Da nun der ungefähre Durchmesser, Röhre *t u*, 6,85 Mill. betrug, so ergiebt dies eine Geschwindigkeit von 1062,8, was mit der berechneten von 1029,7 sehr gut übereinstimmt. Ferner betrug der Abfluss durch das Bohrloch in 2 Minuten 1560 Gramm., also der Abfluss durch die

Röhre *a b* 4700 + 1560 = 6260 Gramm., woraus sich ergiebt, dass die Geschwindigkeit in *a b* 1415,6 Mill. betrug, statt der berechneten 1405,8 Mill. In den übrigen Röhren des Apparates lässt sich die Richtigkeit der berechneten Stromschnelle nur auf indirectem Wege controliren. Nach früher entwickelten Grundsätzen muss die Summe der Geschwindigkeiten in den beiden Röhren des vierten Abschnittes, *p r* und *q s*, gleich sein der Geschwindigkeit im fünften Abschnitt oder in der Röhre *t u*, also 461,5 + 518,3 = 979,8 sollte gleich sein 1029,7. Die berechnete Geschwindigkeit ist also wie immer in diesem Abschnitte etwas zu klein. Weiter sollte die Summe der Geschwindigkeiten in den 4 Collateralröhren des dritten Abschnittes ebenfalls der Geschwindigkeit im fünften gleich sein, 278,4 + 249,1 + 322,8 + 345,8 = 1196,1 sollte sein = 1029,7, woraus sich ergiebt, dass die berechneten Geschwindigkeiten in diesem Abschnitte von den wirklichen in ungewöhnlichem Masse abweichen.

§ 236. Im zweiten Versuche dieser Beobachtungsreihe wurde eine Röhre des dritten Abschnittes angebohrt. Der Wasserabfluss aus dem Bohrloch betrug in 2 Minuten 716 Gramm., der Abfluss aus der Röhre *t u* in derselben Zeit 4977 Gramm., also die Wassermasse, welche durch *a b* strömte, 5693 Gramm.

Aderlass in der Röhre *k o*. Tab. X. Fig. 7.

Bezeichnung der Röhre	Grösse der Seitendruckdifferenz	berechnete Geschwindigkeit	Grösse der Störung
a b	116 Mill.	1287,4 Mill.	+ 0,037
c e	32 »	583,3 »	— 0,039
d f	41 »	684,3 »	— 0,089
g l	15 »	348,1 »	0,0
h m	14 »	331,3 »	0,0 *)

*) Diese Beobachtung und die nächstvorhergehende enthält offenbar einen Fehler. Die Stromschnelle in den beiden Röhren *g l* und *h m* kann nicht unverändert geblieben sein, da sie in *c e* und *p r* eine Verminderung

Bezeichnung der Röhre	Grösse der Seitendruck-differenz	berechnete Geschwin-digkeit	Grösse der Störung
i n	14 Mill.	331,3 Mill.	0,0
k o			
p r	24 »	482,0 »	— 0,098
q s	25 »	482,0 »	— 0,076
t u	92 »	1123,4 »	— 0,070

Dem oben bemerkten Wasserabfluss zu Folge war die Stromschnelle in $a\ b = 1214{,}7$, in $t\ u = 1101{,}7$, was mit den berechneten Werthen wohl übereinstimmt. Im zweiten Abschnitte, d. h. in den Röhren *c e* und *d f*, sollte die Geschwindigkeit $583{,}3 + 684{,}3 = 1267{,}6$ gleich sein der im ersten Abschnitt beobachteten, $= 1214{,}7$, was ziemlich zutrifft, und in den Röhren *p r* und *q s* sollte die Summe der Geschwindigkeiten $482 + 482 = 964$ übereinstimmen mit der Stromschnelle der Röhre *t u*, also $= 1101{,}7$, wobei sich wie immer ein Deficit ergiebt.

§ 237. Am meisten Analogie mit einer Venäsection hat der letzte Versuch, wo die Röhre *p r* angebohrt wurde. Das Bohrloch entleerte in 2 Minuten 1080 Gramm., die Ausflussmündung des Apparates 4775 Gramm., so dass 5855 Gramm. Wasser im Zeitraum zweier Minuten durch *a b* strömten. Das Weitere ergiebt sich aus folgender Tabelle.

---

erlitten hatte. Da sowohl in der Röhre, welche die beiden Collateralen speist *(c e)*, als in der, welche ihr Wasser abführt *(p r)*, eine Verminderung der Geschwindigkeit eingetreten war, so muss dasselbe in den beiden Collateralen nothwendig vorausgesetzt werden. Eine kleine Ueberschätzung der bezüglichen Seitendruckdifferenzen ist die Quelle der Fehler und kann nicht auffallen.

Aderlass in der Röhre *p r*. Tab. X. Fig. 8.

Bezeichnung der Röhre	Grösse der Seitendruck-differenz	berechnete Stromschnelle	Grösse der Störung
a b	122,5 Mill.	1330,7 Mill.	+ 0,072
c e	38,5 »	657,4 »	+ 0,083
d f	40,5 »	679 »	+ 0,080
g l	16 »	364,5 »	+ 0,048
h m	15,5 »	356,3 »	+ 0,076
i n	15 »	348,1 »	+ 0,051
k o	15,5 »	356,3 »	+ 0,024
p r			
q s	30,5 »	565,3 »	+ 0,083
t u	81 »	1041,4 »	— 0,138

Die durch den Wasserabfluss gegebene Geschwindigkeit in Röhre *a b* betrug 1324 statt 1330,7 Mill. der Rechnung. In Röhre *t u* war die Stromschnelle dem Abfluss zu Folge = 1075, der Rechnung nach 1041,4. In den Röhren *c e* und *d f* war die berechnete Geschwindigkeit 657,4 + 679 = 1336,4 Mill. statt 1324 der Beobachtung, und in den 4 Collateralarmen des dritten Abschnittes 364,5 + 356,3 + 348,1 + 356,3 = 1425,2 für 1324 Millim.

§ 238. Das Gesetzliche in den Wirkungen des Aderlasses besteht nun bezüglich der Stromschnelle in folgenden Punkten:

1) Die Stromschnelle erfährt während der Dauer des Aderlasses in allen zuleitenden Gefässen eine Vermehrung und in allen ableitenden Gefässen eine Verminderung.

2) Die Stromschnelle in den Collateralpartien kann nach Massgabe der Umstände vermindert, aber auch vermehrt sein.

Der letztere Punkt kann befremden, scheint aber dennoch haltbar. Er stützt sich auf die beiden Versuche, deren Resultate in Tab. X. Fig. 6 und 8 übersichtlich vorliegen. Ein Aderlass im zweiten Abschnitte (dem arteriellen Systeme analog) hat die

Geschwindigkeit in den Collateralen herabgedrückt, dagegen ein Aderlass im vierten Abschnitte (dem Analogon der Venen) hat die Stromschnelle gesteigert. Es fragt sich nun, ob die Versuche verdächtig sind. Von dem einen derselben, nach welchem die Geschwindigkeit in der Collateralpartie zunimmt, ist dies schlechthin in Abrede zu stellen, denn ich habe § 237 gezeigt, dass die berechneten und beobachteten Geschwindigkeiten sehr genau zusammenstimmen. Anlangend den anderen Versuch, nach welchem eine Abnahme der Geschwindigkeit in den Collateralen stattfinden soll, so fand zwar eine befriedigende Uebereinstimmung zwischen Rechnung und Beobachtung nicht statt, allein die für sämmtliche Röhren der dritten Section berechnete Summe der Geschwindigkeiten fiel höher aus, als sie der Beobachtung nach sein durfte (§ 235), was im höchsten Grade wahrscheinlich macht, dass die Geschwindigkeit in den Röhren *i n* und *k o* nicht unterschätzt, sondern überschätzt wurde. Diese Ueberschätzung kommt aber dem unter 2) aufgestellten Lehrsatz zu Gute, welcher natürlich an Zuverlässigkeit gewinnt, wenn der Versuch, welcher zweifelhaft schien, weil er eine Verminderung der Stromschnelle in den Collateralen angiebt, einer Correctur bedarf, nach welcher diese Verminderung noch beträchtlicher wird. Indem nun das Thatsächliche gesichert scheint, dass Anbohrung einer Röhre unseres Apparates die Stromschnelle in den Collateralen bald steigere, bald vermindere, ist es wichtig zu berücksichtigen, dass diese entgegengesetzten Effecte unter sehr verschiedenen Bedingungen zu Stande kommen. Ob Eröffnung eines zuleitenden Gefässes unter allen Umständen eine Abnahme, dagegen Anbohrung einer ableitenden Röhre stets Steigerung der Stromschnelle in den Collateralen veranlasse, müssen weiter ausgedehnte Versuche entscheiden. Vorläufig ist mir wahrscheinlich, dass dies wirklich der Fall sei. Es fand sich nämlich, dass Aderlass die Geschwindigkeit in den zuleitenden Gefässen jedes Mal steigere und in den ableitenden jedes Mal vermindere. Nun sind zwar die Collateralen im strengeren Sinne weder zuleitend

noch ableitend, allein sie nähern sich in ihren Leistungen bald mehr dem Einen, bald mehr dem Andern. Bei Aderlässen im Systeme der zuleitenden Gefässe verhalten sich die Collateralen mehr ableitend, wie Tab. X. Fig. 6 anschaulich macht, bei Aderlässen im System der ableitenden Gefässe genau umgekehrt, wie auf derselben Tafel Fig. 8 zeigt.

§ 239. Auch hier kann ich nicht zweifeln, dass die an einem todten Apparate aufgefundenen Gesetze für die im Gefässsystem bestehenden physikalischen Verhältnisse massgebend seien. Jeden Falls bestätigt sich dies in allen mir bekannt gewordenen Erfahrungen vollständig. Poisseuille befestigte einen Hämodynamometer im Pfortadersystem eines Pferdes und öffnete dann eine Gekrösarterie, sogleich sank das Quecksilber in Uebereinstimmung mit § 234, Lehrsatz 1. Er öffnete hierauf eine zweite und nachmals eine dritte Gekrösarterie, und nach Massgabe des vermehrten Blutabflusses sank das Quecksilber immer tiefer, stieg aber allmälig wieder, je nachdem von den zerschnittenen Arterien die eine oder zwei oder alle comprimirt wurden, entsprechend dem Lehrsatz 2 des § 234. Wenn man durchsichtige Theile unter dem Mikroskop betrachtet und ein Gefäss ansticht, so sieht man, wie schon Spallanzani schilderte, dass das Blut in den zuführenden Gefässen eine ausserordentliche Beschleunigung, in den ableitenden dagegen eine auffallende Verlangsamung erfährt, wo nicht gar rückwärts läuft. Diese Erfahrung entspricht dem ersten Lehrsatze des vorigen §, nur dass das Rückwärtsfliessen des Blutes die physikalische Folge einer neu auftretenden Bedingung ist, die Folge nämlich der Contraction, welche in den elastischen Gefässwänden nach Oeffnung der Ader eintritt.

Indem wir nun die physikalischen Wirkungen des Aderlasses mit grosser Genauigkeit übersehen, haben wir einen Thatbestand kennen lernen, welcher die Bedingung einer weiteren Reihe von Folgen ist. Solche secundäre Begebnisse lassen sich bis zu einem gewissen Punkte berechnen; und auch im vorliegenden Falle ist es zulässig, bei dem Aufbau des hämodynamischen Lehrgebäudes

ein Material zu benutzen, welches nicht durch die Erfahrung unmittelbar gegeben ist.

Die nächste unvermeidliche Folge des Aderschlagens ist eine Verminderung des Spannungsgrades der Gefässwände. Die Grösse der Spannung ist proportional der Grösse des Seitendrucks, und indem letzterer mit dem Oeffnen einer Ader augenblicklich eintritt, erfolgt ebenso augenblicklich die Entspannung der Gefässwandungen. Dieselbe erfolgt aber nicht in allen Theilen des Gefässsystems in gleichem Masse, sondern nach Verhältniss der Störungsgrössen des Seitendrucks, deren Gesetzlichkeit wir oben entwickelt haben. Diese Abspannung der Gefässe wird weitere Folgen auslösen, die theilweise noch klar genug vorliegen. So wird beispielsweise die Fortpflanzung der Schlauchwellen verzögert werden; eine Erkenntniss, mit welcher freilich nicht viel zu machen ist. Fast fruchtbarer scheint eine Hypothese, die sich hier anknüpft. Man wird annehmen dürfen, dass der Spannungsgrad der Gefässe ein Zustand ist, welcher durch das Mittelglied der Gefässnerven ins Weite reichende Wirkungen veranlasst. Nennen wir diese von den gespannten Gefässwandungen ausstrahlenden Wirkungen, wie passend, Reize, so ergiebt sich sofort, dass mit dem Momente des Aderschlagens eine Veränderung in den Erregungsverhältnissen entstehe, und dass zweifellos gewissen Theilen (den Centralorganen?) eine gewisse Quelle der Erregung unter Umständen der Aufregung entzogen werde. Hiermit könnte die fast blitzschnelle Wirkung, welche Aderlässe in einzelnen Fällen ausüben, und welche eben ihrer Schnelligkeit wegen nicht von den veränderten Nutritionsverhältnissen abgeleitet werden kann, zusammenhängen.

Eine zweite unvermeidliche Folge des Aderlasses ist die Zusammenziehung der Blutgefässe, welche, so lange die Ader geöffnet bleibt, nicht durch das ganze System derselben gleichmässig, sondern aller Orten im umgekehrten Verhältniss der Störungsgrösse des Seitendrucks zu Stande kommt. Die Sachlage ist folgende. Der Seitendruck des Blutes spannt

die Gefässe, und nach Massgabe der Spannung entsteht in den elastischen Gefässwandungen ein Bestreben zur Zusammenziehung. Könnte man das Blut durch ein Zaubermittel plötzlich aus dem Körper entfernen, so ist einleuchtend, dass die Arterien sich stärker zusammenziehen würden als die Venen, und zwar deshalb, weil sie in Folge grösserer Spannung auch ein grösseres Bestreben haben mussten, in den Zustand der Ruhe zurück zu kehren. Nun lehren aber unsere Versuche, dass mit dem Oeffnen der Ader sich die Spannungsverhältnisse an verschiedenen Punkten des Gefässsystems in verschiedenem Masse ändern, und folglich ist auch die Tendenz zur Contraction an verschiedenen Punkten eine verschiedene. Wenn beispielsweise nach Eröffnung der Ader die Störungsgrösse des Seitendrucks an einem Punkte $x = -0{,}50$ und an einem Punkte $y = -0{,}25$ beträgt, so kann kein Zweifel sein, dass die expandirende Kraft in x um doppelt so viel als in y vermindert werde, und dass folglich die dem Contractionsbestreben gewordene Freiheit sich in x und y wie $2 : 1$ verhalte.

Die normale Vertheilung der Druck- und Geschwindigkeitswerthe erfährt im Momente, wo die Ader geöffnet wird, eine Veränderung, es treten in den Werthen Disproportionen ein, welche vordem nicht statt fanden. Das Offenstehen der Aderlasswunde ist also die Ursache einer Disharmonie in den hämodynamischen Verhältnissen, welche für das Spiel der Lebenskräfte sicherlich nicht gleichgültig ist. Fraglich könnte nur sein, ob die Effecte dieser Disharmonie bedeutend genug sind, um in der wissenschaftlichen Pathologie eine Erörterung zu verdienen. Diese Frage würde bejaht werden müssen, wenn sich finden sollte, dass die Wirkung des Aderlasses nicht allein durch die Quantität des abgezogenen Blutes bestimmt wird. Der Aderlass kann nämlich nur in doppelter Weise einen Einfluss ausüben, einmal durch Verminderung der Blutmenge und alle hieran sich knüpfenden Folgen, namentlich in der Sphäre der Nutrition, und dann durch Umwandlung der in den Gefässwandungen bestehen-

den Spannungsverhältnisse während der Zeit selbst, wo die Ader offen steht.

Nun giebt es aber in der That Wirkungen des Aderlasses, welche vom Blutquantum unabhängig sind. Dieselbe Blutmenge, welche entfernt wird, wirkt ganz verschieden, wenn sie aus einer Schlagader oder einer Vene genommen wird. In diesem Falle wäre freilich denkbar, dass die verschiedene Beschaffenheit der Blutarten die Verschiedenheit der Wirkung bedingte; aber nach übereinstimmenden Angaben der tüchtigsten Praktiker ist auch bei Venäsection die Wirkung nicht allein von der Grösse des Aderlasses, sondern in hohem Grade von der Grösse der Venenwunde abhängig. Nach Krukenberg wirkt namentlich bei Pneumonien der Aderlass viel heilsamer, wenn die Lanzette eine grosse Wunde herstellt und das Blut rascher abläuft. Hier bleibt nichts übrig, als an die Verschiedenheit der physikalischen Constellationen zu denken, welche, in dem kurzen Zeitraume der Operation selbst, bei Anlegung grösserer oder kleinerer Wunden eintritt.

Wenn nun, wie solche Erfahrungen andeuten, die während des Aderlasses eintretende Umgestaltung der physikalischen Constellationen, also die vorübergehenden Disproportionen in dem Blutdruck und in der Stromschnelle, nachhaltige Erfolge hervorbringen; so ist überaus wahrscheinlich, dass der Ort des Aderlasses für die hervorzurufenden Effecte nichts Gleichgültiges sei. So könnte man sich denken, dass in den Fällen, wo der Aderlass die Beseitigung einer entzündlichen Stasis bezweckt, die Oeffnung einer Vene angezeigt sei, welche das Blut des kranken Theils direct ableitet; denn da dies das wirksamste Mittel ist, die Stromschnelle empor zu treiben, so ist es muthmasslich auch der sicherste Weg, die ins Stocken gerathene Bewegung wieder herzustellen.

§ 240. Die Disharmonie, welche in den hämodynamischen Functionen mit Oeffnung einer Ader plötzlich eintritt, verschwindet ebenso plötzlich mit dem Verschlusse der Wunde. Es hebt

sich sogar der Blutdruck, obschon in der Regel und namentlich nach reichlichen Blutentleerungen nicht auf seine ursprüngliche Höhe. Unter den physikalischen Folgen des Aderlasses, welche nach Verschluss der Wunde zurückbleiben, sind Verminderung der Stromschnelle und Sinken des Blutdrucks die wichtigsten.

Anlangend die Verminderung der Stromschnelle, so kann diese unter Umständen von einer Schwächung der Herzkraft abhängen, aber jeden Falls muss die durch den Blutverlust bedingte Contraction der Gefässhöhle die Geschwindigkeit herabdrücken. Dies kann vom Standpunkt der Physik aus überhaupt nicht zweifelhaft sein, indess haben die § 117 mitgetheilten Erfahrungen die Abhängigkeit der Stromschnelle vom Durchmesser der Gefässe ausdrücklich nachgewiesen. Natürlich hindert dies nicht, dass trotz der eintretenden Verengerung der Gefässhöhle die Geschwindigkeit der Blutbewegung sich gleich bleibe oder wohl gar wachse, da die Ursache derselben, die Herzkraft, vom Aderlass nicht unmittelbar abhängig ist und ausnahmsweise nach Blutverlusten selbst zunimmt.

Was ferner den Blutdruck betrifft, so braucht die Verminderung desselben schon darum nicht dem Blutverluste proportional zu sein, weil er eine Function der Geschwindigkeit ist, welche, wie eben bemerkt wurde, von der Menge des gelassenen Blutes nicht unmittelbar abhängt. Den auffallendsten Beweis für die relative Unabhängigkeit des Blutdrucks vom Blutverluste bietet nachstehende, von Hales angestellte Beobachtungsreihe.

Versuche an einer 14jährigen Stute.

Versuch	Blutverlust nach Pinten	Höhe des Blutstandes im Druckmesser
1	—	99 Zoll engl. Mass.
2	1	92 »
3	2	86 »
4	3	78,5 »
5	4	82,5 »

Versuch	Blutverlust nach Pinten	Höhe des Blutstandes im Druckmesser
6	5	72,5 Zoll engl. Mass.
7	6	65,5 »
8	7	56 »
9	8	39 »
10	8,5	43,5 »
11	9	46 »
12	9,5	42,5 »
13	10	45,5 »
14	10,5	51,5 »
15	11	44 »
16	11,5	46,5 »
17	12	45 »
18	12,5	43,5 »
19	13	38 »
20	13,5	48,5 »
21	14	45 »
22	14,5	39 »
23	15	40,5 »
24	15,5	37 »
25	16	28 »

Schon vom neunten Versuche an wurden die weiteren Blutentziehungen fast erfolglos. Indess ist eine derartige Unabhängigkeit des Blutdrucks von der Stärke des Aderlasses als eine Ausnahme zu betrachten, die selten vorkommen mag und von mir nie in ähnlicher Weise wahrgenommen wurde. In vier Beobachtungsreihen, welche ich an drei Hunden und einem Kalbe ausführte, war jeder neue Blutverlust mit einem Sinken des Blutdrucks verbunden.

§ 241. Die allgemeine Verminderung des Blutdrucks, welche in der Regel nach Aderlässen eintritt, muss einen beschleunigten Eintritt des Chylus in die Venen zur Folge haben. Es versteht sich nämlich von selbst, dass der Seitendruck des Blutes in den

grossen Venenstämmen ein Moment ist, welches den Ausfluss des Chylus behindert, und folglich wirkt die Verminderung dieses Seitendrucks für die Bewegung des Chylus förderlich. Unter diesen Umständen darf man annehmen, dass gleichzeitig mit einem Aderlasse ein vermehrter Uebergang von Chylus in das Blut stattfinde, wodurch dann letzteres verdünnt werden müsste. Eine solche Verdünnung des Blutes ist auch von mehreren Seiten wahrgenommen worden; sie war in den Versuchen, welche ich an einem Kalbe anstellte, so auffällig, dass sie mit dem blossen Auge wahrgenommen werden konnte und von den assistirenden Studenten selbstständig bemerkt wurde. Es bedarf der Bemerkung kaum, dass starke Aderlässe schon in dieser Beziehung einen weitreichenden Einfluss haben müssen, sie verändern die Mischung des Blutes und beschleunigen die Strömung im lymphatischen Systeme; zwei Umstände, welche für den Ernährungsprozess von grösstem Belange sind.

Erklärung der Abbildungen.

Tab. I. Ludwigs Kymographion. Vergl. S. 148.

Tab. II. Poisseuilles Hämodynamometer in der Weise umgeändert, dass er am Kymographion zum Aufzeichnen der Pulscurven dienlich ist. Vergl. S. 148 u. f.

Fig. 1. Hämodynamometer. *A A'* ein Brettchen, auf welchem die mit Quecksilber zu füllende Glasröhre *B B' B''* angebracht ist. *C C' C''* eine Zinnröhre, welche durch einen Kork, *D*, mit dem horizontalen Aste der Glasröhre *B''* luftdicht verbunden ist. Der am stärksten nach oben gebogene Abschnitt dieser Zinnröhre ist mit einer Oeffnung versehen, welche sich durch einen eingeriebenen Stöpsel, *E*, verschliessen lässt. *F* ein Hahn, an dessen freiem konischem Ende sich die Kanüle anstecken lässt, welche in ein geöffnetes Blutgefäss eingebunden ist. Mit Hülfe dieses Hahnes kann man den Eintritt des Blutes in den Manometer be-

liebig verhindern oder zulassen, man kann ferner durch mehr oder weniger vollständiges Oeffnen des Hahnes die Grösse der Pulswellen nach Wünschen regeln. — *G G'* ein mit dem Brettchen *A A* verbundener hölzerner Arm, welcher zur Unterstützung der Zinnröhre dient und das Wegbrechen der horizontalen Glasröhre *B''* verhindert. *H* ein sattelartiges Stückchen Holz, welches auf *G G'* hin und her geschoben werden kann und zur unmittelbaren Stütze der Zinnröhre dient.

Fig. 2. Eine messingene Kapsel, welche sich auf das oberste freie Ende der Glasröhre (Fig. 1. *B* und Fig. 3 *b*) aufstecken lässt, um als Führung für den Schwimmer zu dienen.

Fig. 3. Der Schwimmer mit dem Zeichenapparate; *a* die als Führung dienende Messingkapsel; *b* das obere Ende der Glasröhre des Hämodynamometers; *c c'* der prismatische eiserne Schwimmer, in seinem obersten Ende; *d* eine am Schwimmer angebrachte Kugel, welche transversal durchbohrt ist, damit der Pinselstiel, *e e*, durch das Bohrloch gesteckt werden könne; *f* der Pinsel.

Tab. III. Der Hämodromometer. Vergl. die Beschreibung S. 185 u. f.

Fig. 1. Das vollständige Instrument, in horizontaler Lage, von oben betrachtet. *A* das messingene Hauptstück desselben.

Fig. 2. Das messingene Hauptstück des Hämodromometers, von unten betrachtet.

Fig. 3. Dasselbe im Durchschnitt bei derjenigen Stellung der Hähne, wo das Blut vom Eintritt in die Glasröhre abgehalten ist.

Fig. 4. Dasselbe bei solcher Stellung der Hähne, wo dem Blute der Durchtritt durch die Glasröhre gestattet ist.

Tab. IV. Künstliche Pulscurven, welche die Wellenbewegung des Wassers durch einen Gummischlauch versinnlichen, S. 121. Jede Figur bietet zwei Curven, welche die gleichzeitige Wellenbildung in zwei verschiedenen Abschnitten des Schlauches darstellen. In allen Fällen bezeichnet *a b* die Curve, welche durch das weiter nach oben stehende Kymographion gebildet wurde, und *α β* diejenige, welche dem weiter abwärts, d. h. der Ausflussmündung des Schlauches näher stehenden Kymo-

graphion angehört. In allen Curven geht die Bewegung von rechts nach links, so dass die rechte Seite eines Wellenberges der Erhebung, die linke der Senkung entspricht.

Tab. V. Darstellung wirklicher Pulscurven von kaltblütigen Thieren. Die Bewegung der Wellen geht von rechts nach links, daher der Effect der Systole sich auf der rechten Seite des Wellenberges ausdrückt, der Effect der Diastole auf der linken Seite. Die Ordinaten der Curven entsprechen dem halben Quecksilberdrucke des Blutes; zu vergl. S. 151 Anmerkung.

Fig. 1. Pulscurve eines Hechtes (*lucius esox*).

Fig. 2. Desgleichen.

Fig. 3. Pulscurve einer Barbe (*cyprinus barbus*).

Fig. 4—6. Pulscurven von Fröschen.

Tab. VI. Pulscurven warmblütiger Thiere. Die Bewegung der Wellen geht von rechts nach links. Die zu gewissen Punkten der Curven geschriebenen Nummern bezeichnen die Grössen der bezüglichen Ordinaten in Millimetern. Die Geltung der Ordinaten wie in Tab. V.

Fig. 1. Pulscurve des Haushuhnes.

Fig. 2. Pulscurve eines Schafes.

Fig. 3. Pulscurve eines kleinen Hundes.

Fig. 4. Pulscurve eines grossen Hundes.

Fig. 5. Pulscurve des zu Fig. 2 benutzten Schafes, etwas später gezeichnet.

Fig. 6. Pulscurve eines Pferdes.

Fig. 7. Pulscurve einer Katze.

Tab. VII. Isochrone Pulscurven an Warmblütigen, welche durch gleichzeitige Einführung zweier Hämodynamometer in verschiedene, vom Herzen ungleich weit entfernte Arterien erhalten sind. In allen Fällen gehört Curve $a\ b$ zu dem Gefässe, welches dem Herzen näher liegt, und also $\alpha\ \beta$ zu der entfernteren Schlagader. Die Distanz der beiden zu einer Figur gehörigen Curven entspricht der halben Differenz des Blutdrucks, insofern letzterer durch die Höhe einer Quecksilbersäule gemessen wird. Die an verschiedenen Punkten der Curven notirten Zahlen bezeichnen

die Werthe der Ordinaten in gleicher Weise, wie Tab. V und VI erörtert wurde.

Fig. 1. Pulscurven des Hundes, *a b* in der *carotis centralis*, *α β* in der *carotis peripherica*.

Fig. 2. Desgleichen am Schafe.

Fig. 3. Desgleichen.

Fig. 4. Desgleichen.

Fig. 5. Pulscurven des Hundes, *a b* in der *carotis*, *α β* in der *cruralis*.

Tab. VIII. Es wiederholen sich alle zu Tab. VII gemachten Bemerkungen.

Fig. 1. Pulscurven des Hundes, *a b* in der *carotis*, *α β* in der *cruralis*.

Fig. 2. Pulscurven des Kaninchens, *a b carotis*, *α β cruralis*.

Fig. 3. Pulscurven des Hundes, *a b carotis centralis*, *α β carotis peripherica*.

Fig. 4. Pulscurven des Schafes, *a b carotis centralis*, *α β carotis peripherica*. Ein Fall, wo die Distanz der beiden Curven ausnahmsweise gering ist.

Fig. 5. Pulscurven des Kalbes, *a b carotis centralis*, *α β carotis peripherica*.

Tab. IX. Sämmtliche Figuren dieser Tafel sind Darstellungen eines Systems von Röhren, welches nach Analogie der Blutgefässe verzweigt ist, und welches S. 54 beschrieben wurde.

Fig. 1 bezeichnet durch die Buchstaben *a b . . . u* diejenigen Punkte des verzweigten Röhrensystems, an welchen Druckmesser angebracht sind.

Fig. 2. Die Zahlen, welche hier an die Stelle der Buchstaben treten, bezeichnen in Millimetern den Werth des Seitendrucks, welcher in jedem bezüglichen Druckmesser beobachtet wurde, wenn Wasser bei einer Fallhöhe von 691 Mill. durch den Apparat floss.

Fig. 3, 4 und 5 beziehen sich auf Versuche, wo das Wasser ebenfalls durch eine Fallhöhe von 691 Mill. in Bewegung gesetzt wurde, wo aber die eine oder andere Stelle des Apparates durch einen Hahn (in den Figuren durch ⊤ angedeutet) abgeschlossen

war. Die Zahlen an der Stelle der Druckmesser beziehen sich auf die Veränderung, welche der Seitendruck an dem betreffenden Punkte erlitten hat. Die Grösse der Veränderung ist als aliquoter Theil des ursprünglichen (in Fig. 2 verzeichneten) Drucks aufgefasst und deshalb durch Decimalen notirt. Zahlen über die Röhren geschrieben, deuten auf Vermehrung des Seitendrucks, Zahlen unter den Röhren auf Verminderung desselben.

Fig. 6. Die Zahlen bezeichnen den Werth der Stromschnelle für die bezügliche Röhre, wenn das Wasser durch eine Fallhöhe von 691 Mill. in Bewegung gesetzt und durch Offenstehen sämmtlicher Hähne nirgends aufgehalten wird.

Fig. 7 und 8 bezeichnen die Werthe der Stromschnelle, wenn bei sich gleichbleibender Fallhöhe die Hähne bei ⊤ verschlossen werden. Die Decimalzahlen über und unter den Röhren sind ebenso zu verstehen, wie in Fig. 3, 4, 5, nur ist die Einheit, auf welche sie sich beziehen, der in Fig. 6 verzeichnete Werth für v.

Tab. X. Vollkommen analog der vorigen Tafel, indem es sich überall um Druckhöhen und Geschwindigkeiten bei einer Fallhöhe von 691 Mill. handelt.

Fig. 1 wie Fig. 1 auf Tab. IX.

Fig. 2 wie Fig. 7 und 8 auf Tab. IX.

Fig. 3, 4, 5 beziehen sich auf die Veränderung, welche der Seitendruck erfährt, wenn eine Röhre an dem mit * bezeichneten Punkt (nach Analogie eines Aderlasses) geöffnet wird.

Fig. 6, 7, 8 geben die Aenderungen der Stromschnelle an, welche unter den eben bemerkten Bedingungen eintreten.

Druckfehler und Verbesserungen.

Seite 29 Zeile 10 v. u. statt b^2 lies: bv.
- 32 - 9 v. o. statt $\frac{1}{2\,8\,5}$ lies: $\frac{1}{2\,8,5}$.
- 43 in der Ueberschrift des Cap. III. statt Flüssigkeit lies: Flüssigkeiten.
- 54 in der Ueberschrift des Cap. IV. statt Flüssigkeit lies: Flüssigkeiten.
- 58 Zeile 2 v. u. statt $S = s$ lies: $S, = s$.
- 60 - 9 v. u. statt der ganze lies: im ganzen.
- 61 - 1 v. o. statt Abschnitt lies: Abschnittes.
- 72 - 10 v. u. statt Gefässwanden lies: Gefässwänden.
- 101 - 13 v. u. statt Membram lies: Membranen.
- 123. Die Figur ist in Bezug auf rechts und links verkehrt gezeichnet und muss im Spiegel betrachtet werden, um zu den Figuren der Tab. IV zu passen, auf welche sie Bezug nimmt.
- 207 Zeile 4 v. o. statt über lies: für.
- 270 - 9 v. u. statt dasse in lies: dass ein.
- 302 - 4 v. u. statt Hämodromometer lies: Hämodynamometer.
- 367 - 3 v. o. nach dem Worte Beobachtung einzuschieben: Vergl. Tab. VI. Fig. 2.
- 405 - 13 v. o. statt eines elektrischen lies: eines schwachen elektrischen.
- 443 - 7 v. o. hinter dem Worte Pulscurven ist einzuschieben: mit Doppelwellen.
- 455 - 2 v. u. statt 120,7 lies: 1207,7.
- 458. In der ersten Columne der Tabelle ist für $a\,f$ zu lesen $d\,f$, und die Grösse der Druckdifferenz in dieser Röhre sollte in der zweiten Columne nicht mit 0 Mill. angegeben sein, sondern jede Bezeichnung sollte fehlen, weil sie gar nicht zur Beobachtung kam.

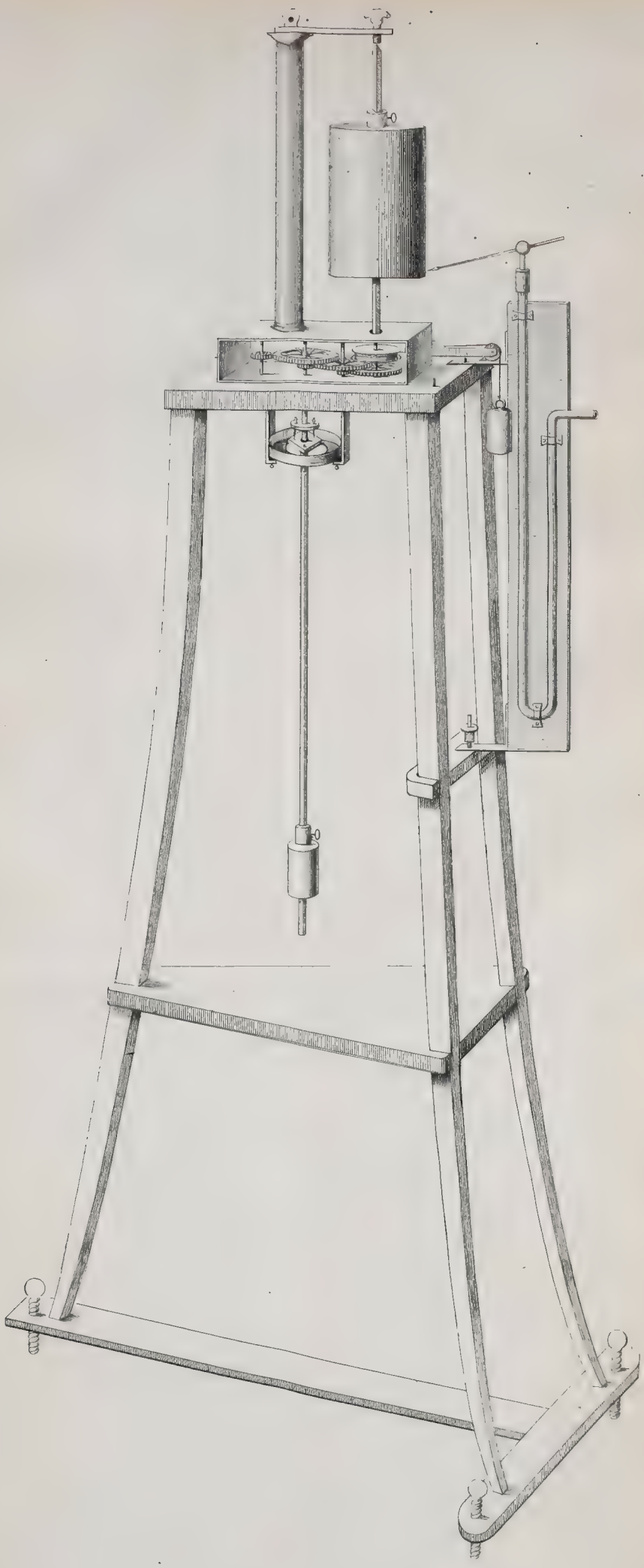


Fig. 1.

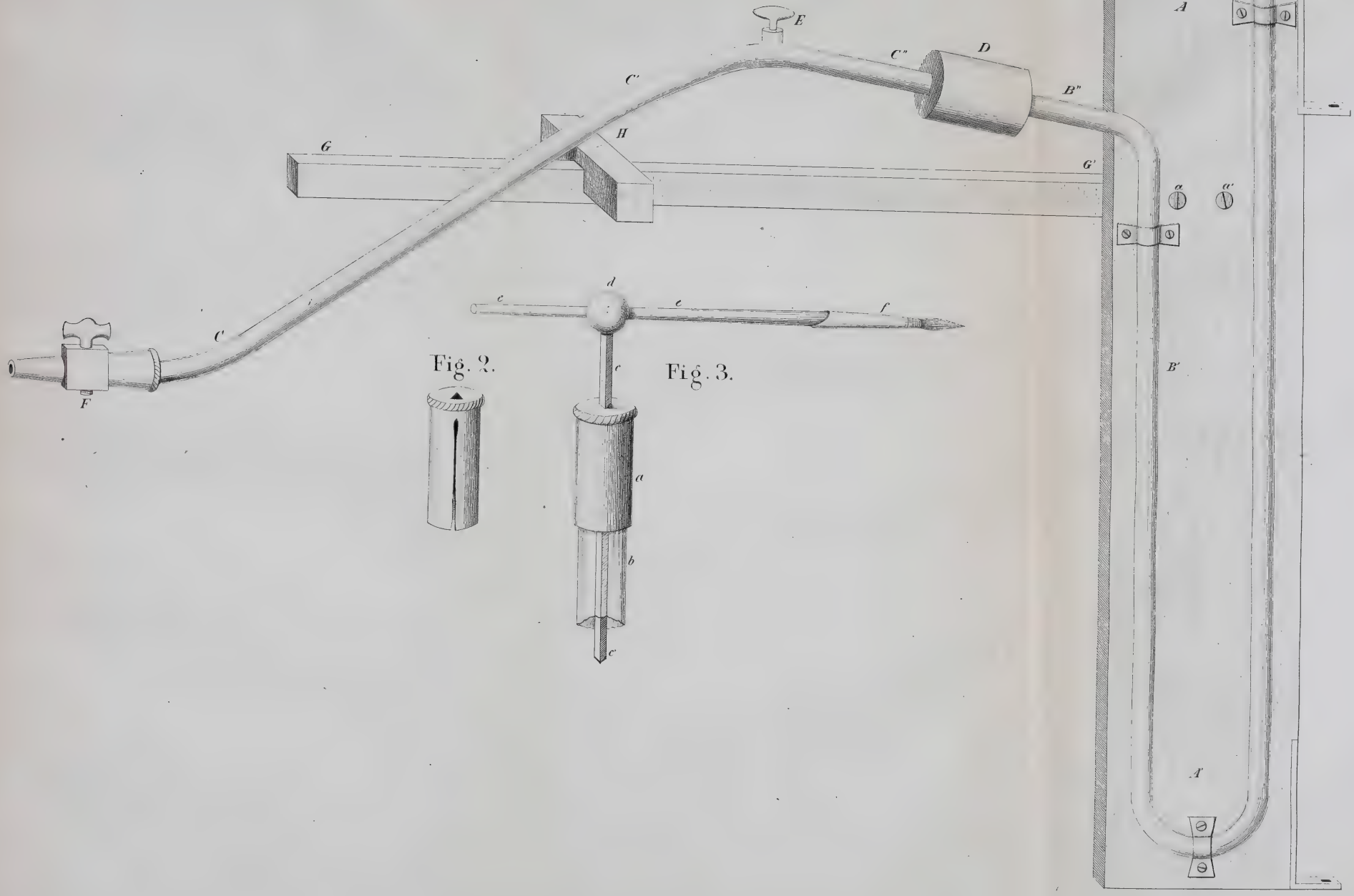


Fig. 2.

Fig. 3.

Fig. 1.

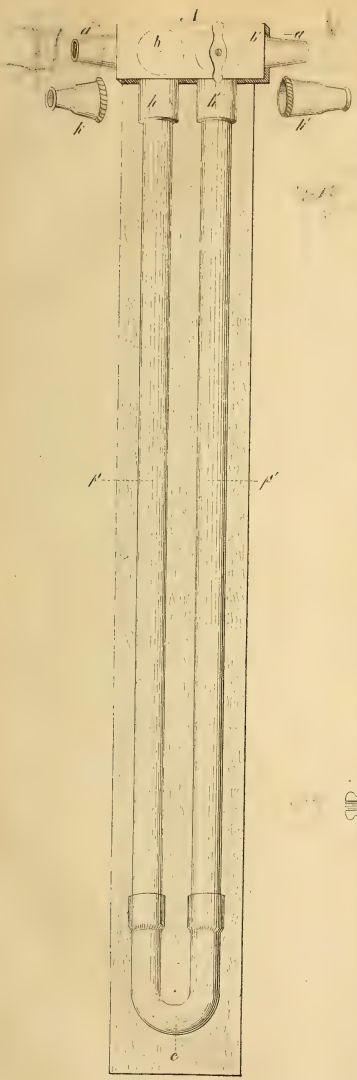


Fig. 3.

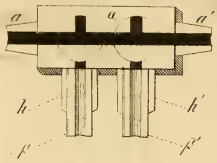


Fig. 2.

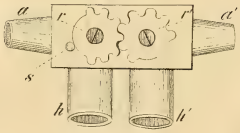


Fig. 4.

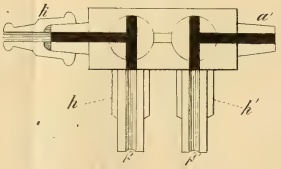
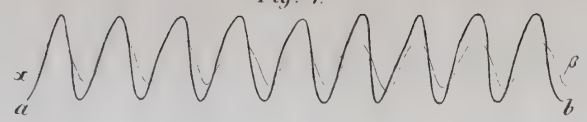


Fig. 1.



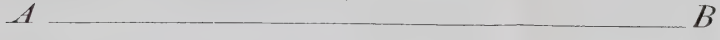


Fig. 2.

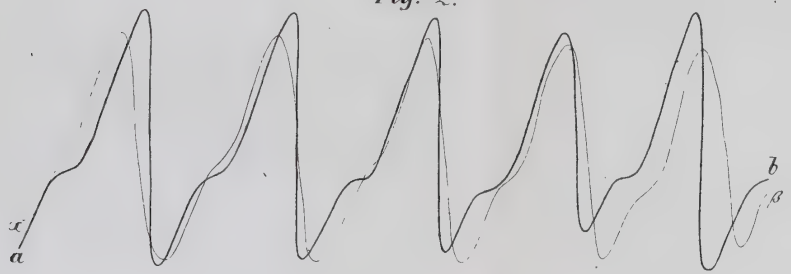


Fig. 3

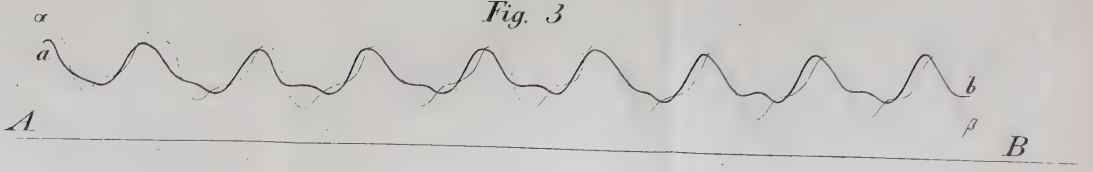


Fig. 4.

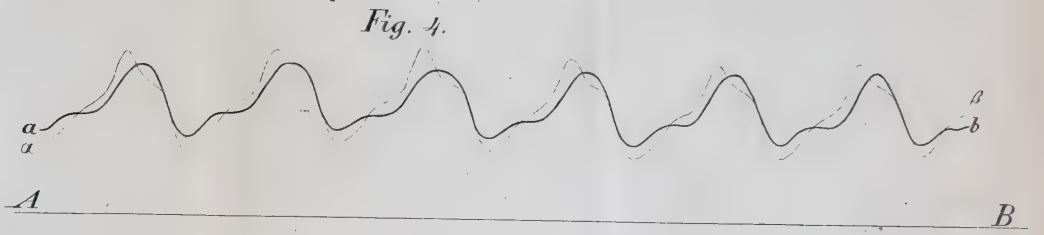


Fig. 5.

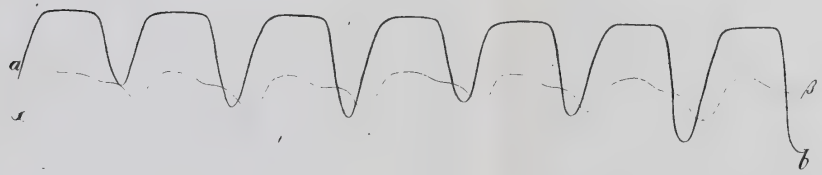


Fig. 6.

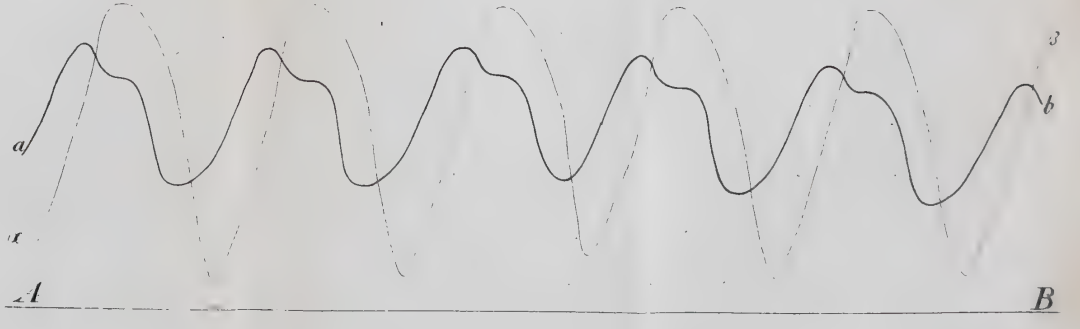
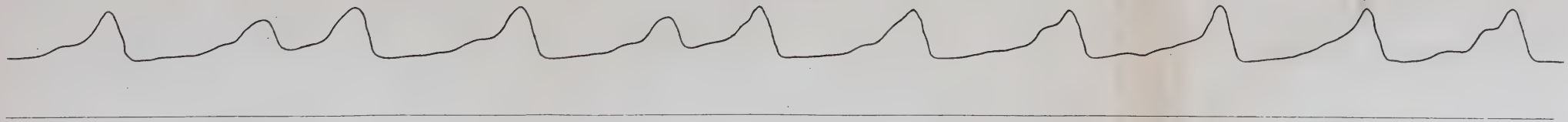


Fig. 1.



Abscisse. Abscisse.

Fig. 2.

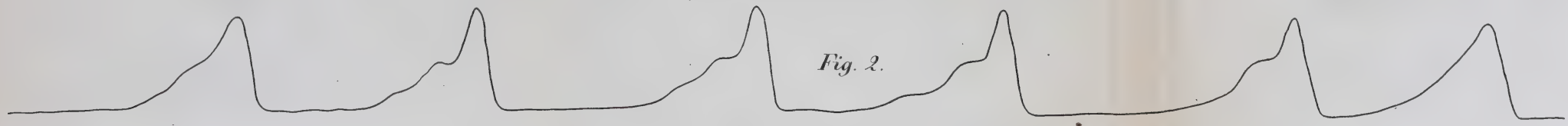


Fig. 3.

Abscisse. Abscisse.

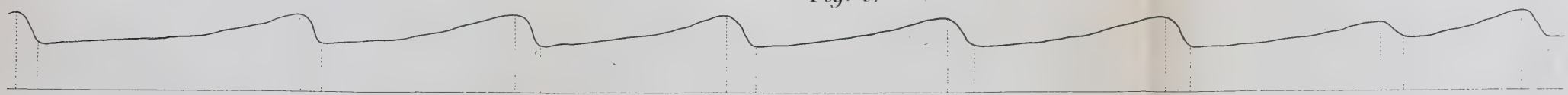
Fig. 4.

Abscisse. Abscisse.

Fig. 5.

Abscisse. Abscisse.

Fig. 6.



Abscisse. Abscisse.

Fig. 1.

Fig. 2.

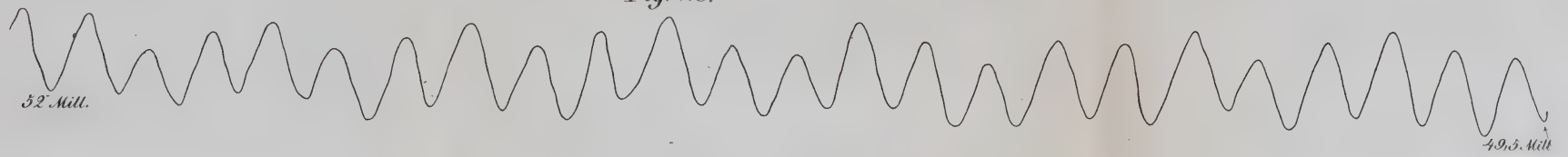


Fig. 3.

Fig. 4.

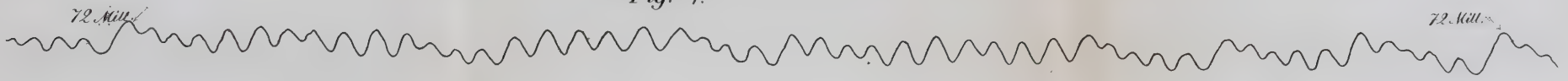


Fig. 5.

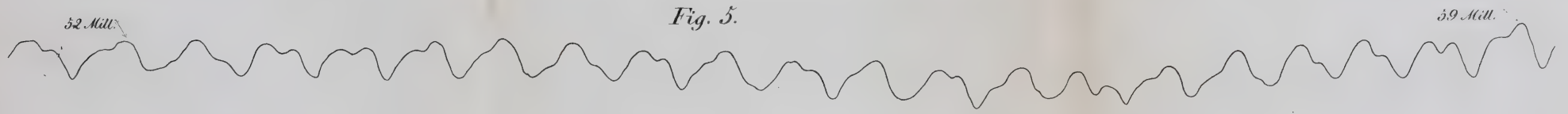


Fig. 6.

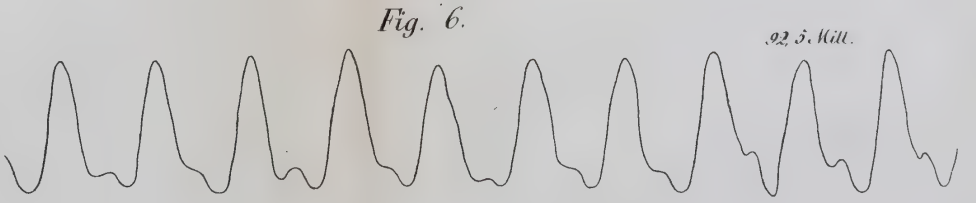


Fig. 7.

Fig. 1.

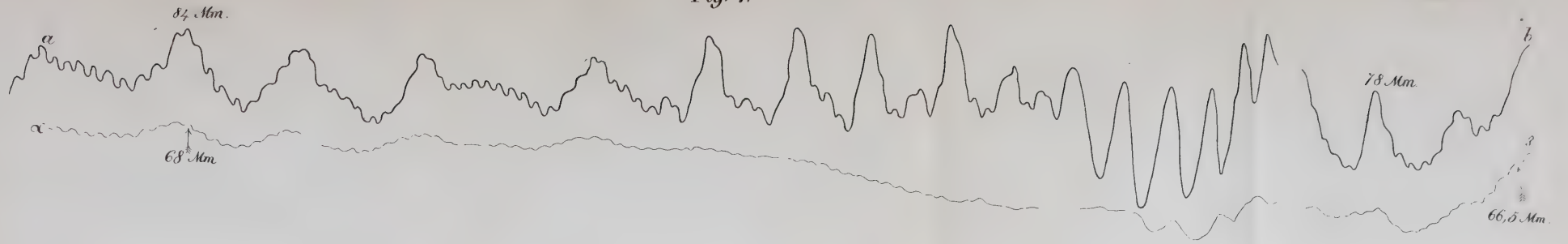


Fig. 2.

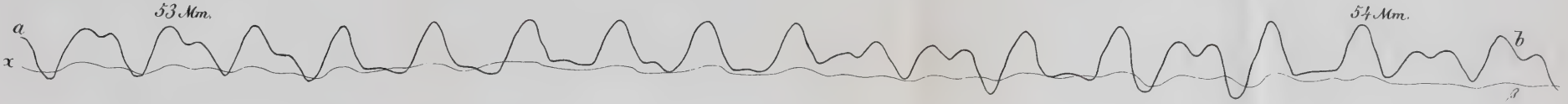


Fig. 3.

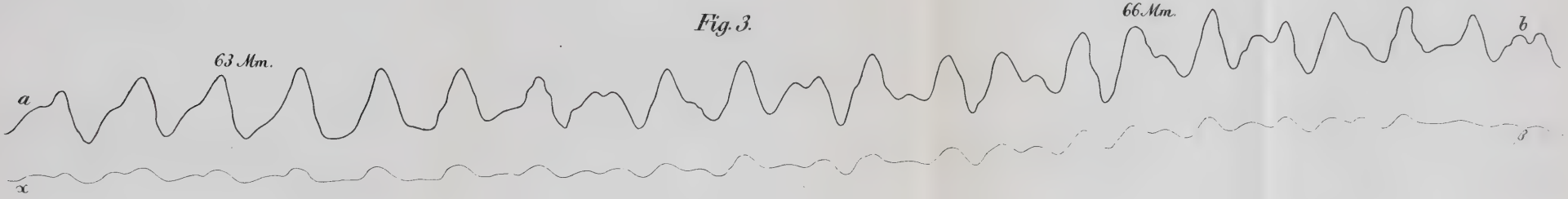


Fig. 4.

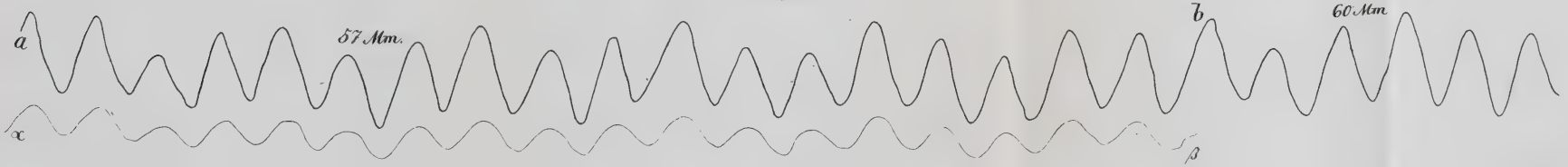


Fig. 5.

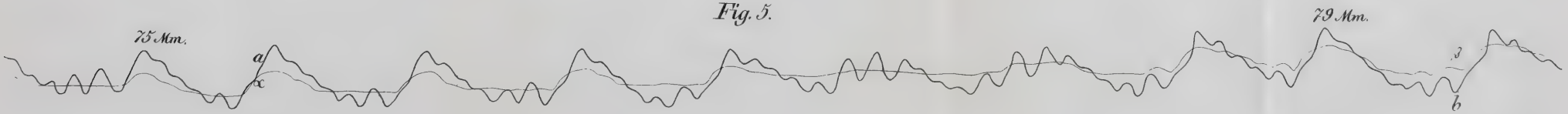


Fig. 1.

Fig. 2.

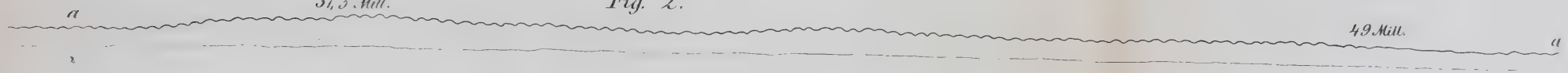


Fig. 3.

Fig. 4.

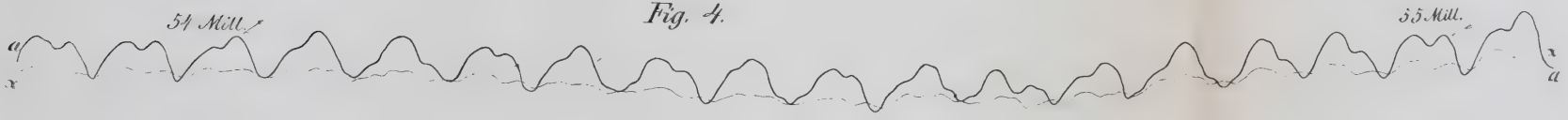


Fig. 5.

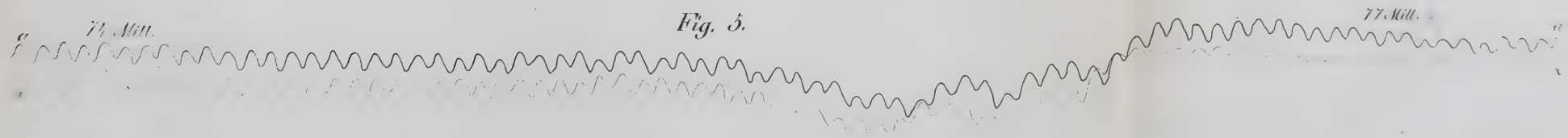


Fig. 1.

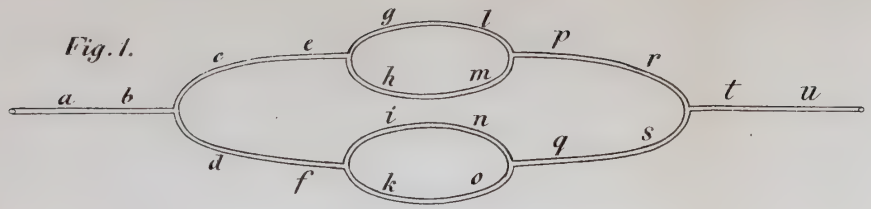


Fig. 2.

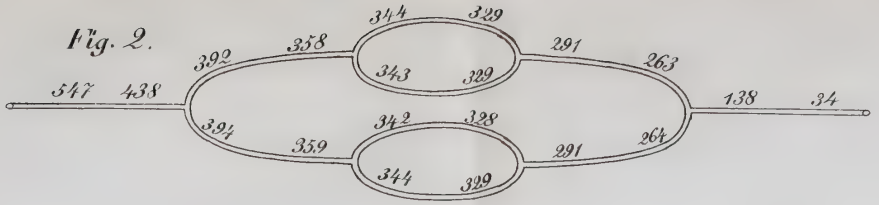


Fig. 3.

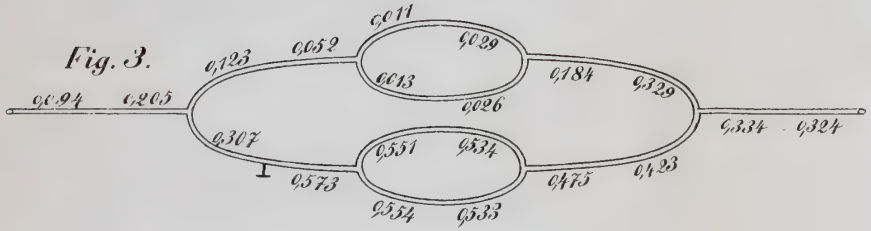


Fig. 4.

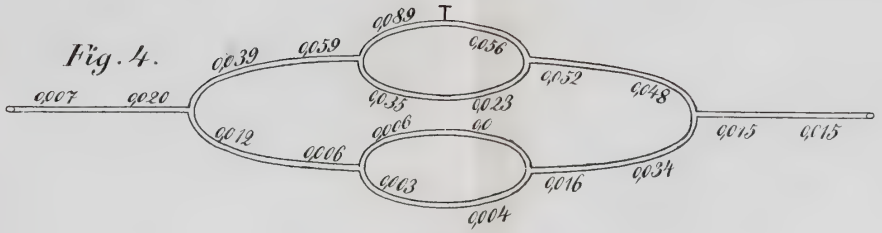


Fig. 5.

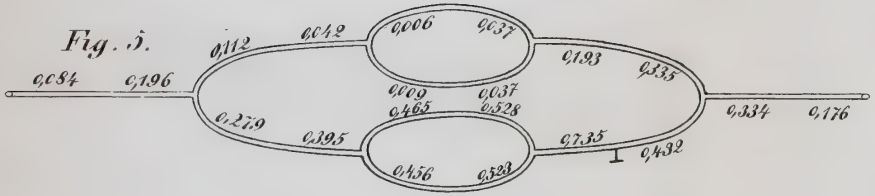


Fig. 6.

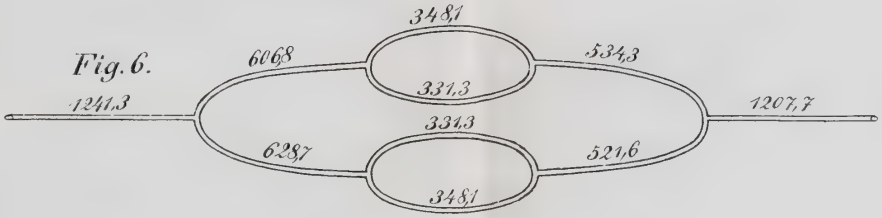


Fig. 7.

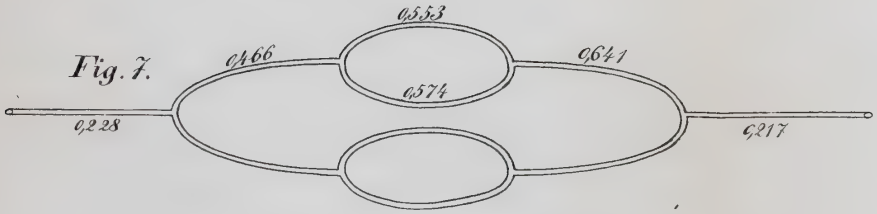


Fig. 8.

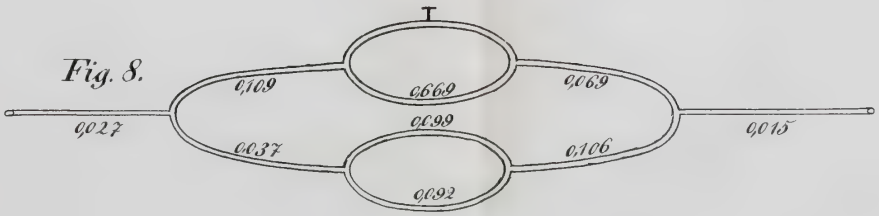


Fig. 1.

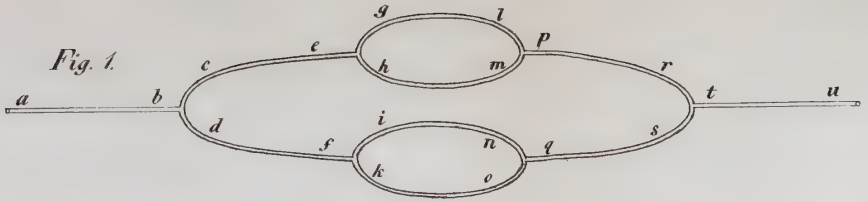


Fig. 2.

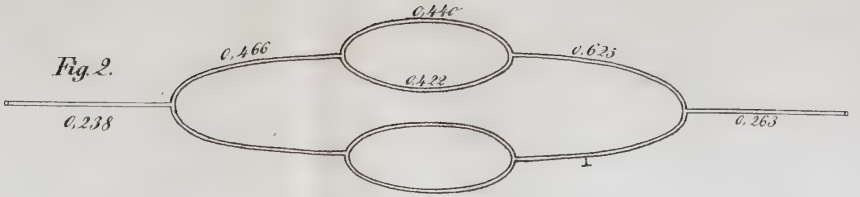


Fig. 3.

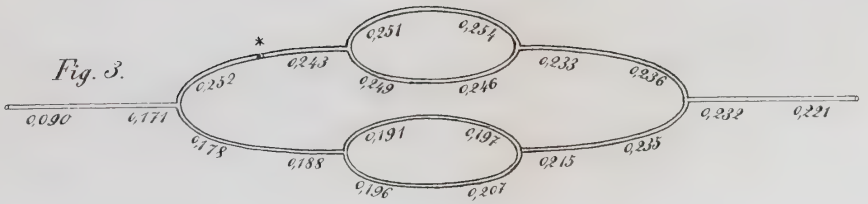


Fig. 4.

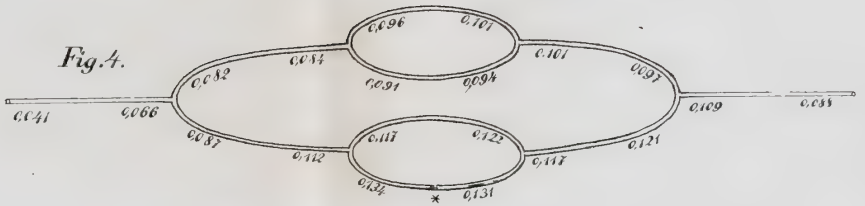


Fig. 5.

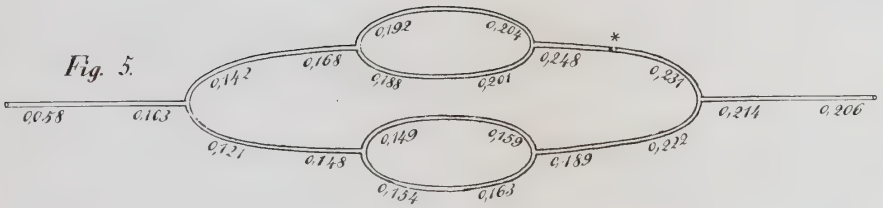


Fig. 6.

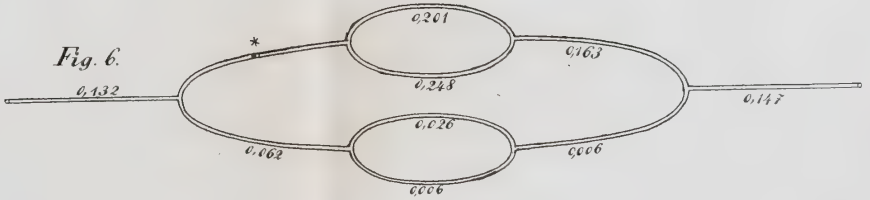


Fig. 7.

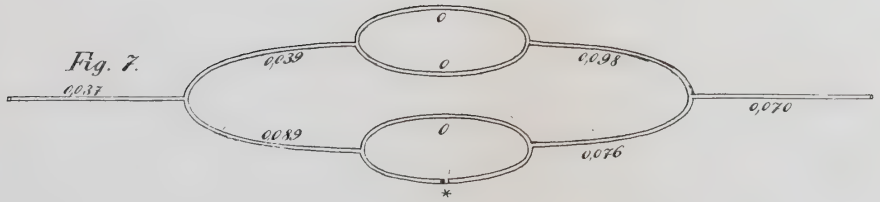
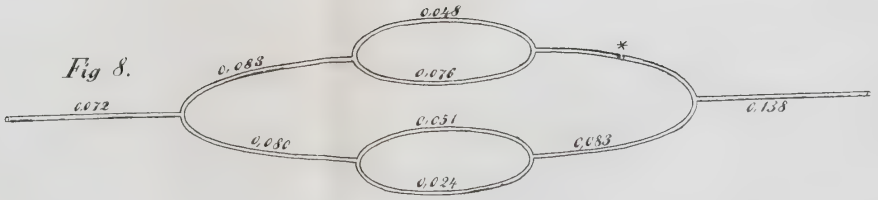


Fig. 8.



Acc no.
214541